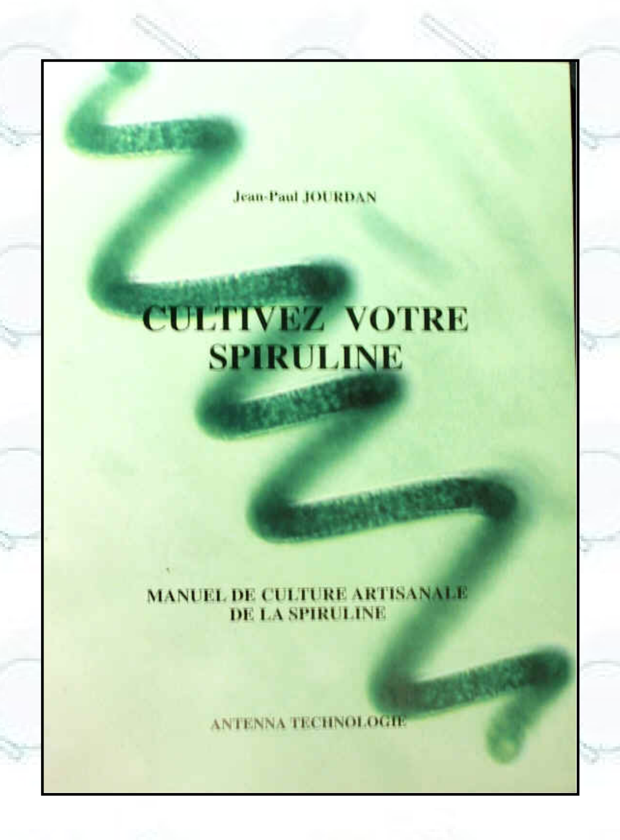
Publications éditées par ANTENNA TECHNOLOGY :

- **Cultivez votre spiruline**
  Jean-Paul Jourdan, 1999, 125 pages.
  Version papier en français seulement
  (16.80 € commander à Antenna)
  Résumés en anglais et en espagnol disponibles sur notre site.



- **Spiruline: Aspects Nutritionnels** (Jacques Falquet, 1996, 22 pages. Français, Anglais, Espagnol, Allemand). Version papier: 3.80 € commander à Antenna
- **Un module d'apprentissage pour la production de spiruline** (Jacques Falquet, 1999, 16 pages. Français, Anglais, Espagnol). Version papier: 3.80 € commander à Antenna
- Cahier Antenna n°1 : **Malnutrition un massacre silencieux** (Denis von der Weid, 2000, 13 pages. Français, Anglais, Espagnol) Version papier: 3.80 € commander à Antenna
- Cahier Antenna n°2 : **Nutrition et malnutrition chez l'enfant** (Jean-Claude Dillon, 2000, 18 pages. Français, Anglais, Espagnol) Version papier: 3.80 € commander à Antenna)

- Cahier Antenna n°3 : **Une réponse durable à la malnutrition en régions chaudes : la production locale de spiruline** (Jacques Falquet, 2000, 12 pages. Français, Anglais, Espagnol). Version papier: 3.80 €commander à Antenna

- Cassette vidéo (VHS, 20 min) sur la production de spiruline, français ou anglais (16.80 € commander à Antenna)



MANUEL DE CULTURE ARTISANALE DE SPIRULINE

(For resumé and calculations in **English** :grow.htm)

(**Détails sur les dernières révisions faites** dernières révisions.htm)

SOMMAIRE

* * *

PRESENTATION



J.P. Jourdan fait part ici de son expérience pratique de plus de dix années de production de la spiruline et montre aussi comment appliquer les méthodes du génie chimique pour perfectionner cette production même à petite échelle et sans moyen technique sophistiqué. Il donne une foule de détails permettant de construire l'installation de culture et de conduire sa marche dans des circonstances très variées, mais aussi d'évaluer et d'optimiser le prix de revient de cette micro-algue si demandée actuellement pour ses vertus alimentaires ou autres.

Diplomé du M.I.T., J.P. Jourdan a fait sa carrière dans l'industrie chimique avant de consacrer sa retraite dans le sud de la France au développement de la spiruline en faveur des enfants du Tiers-Monde. Après avoir été "élève ès spiruline" auprès de Ripley D. Fox et de Francisco Ayala, il collabore activement avec Antenna Technologie et plusieurs autres O.N.G. dans le domaine de la spiruline.

LIMINAIRE

L'objectif de ce manuel est de former des formateurs pour diffuser et rendre accessible à un plus grand nombre la culture et la consommation de la spiruline, et aider les futurs "jardiniers" (jardiniers du futur ?) à contrôler un certain nombre de paramètres pour produire à l'échelle familiale, coopérative ou communautaire un aliment dont les qualités nutritionnelles sont aujourd'hui reconnues, mais qui leur reste pratiquement inaccessible, du moins à l'état frais. Il n'est pas de fournir les éléments nécessaires pour une exploitation répondant seulement à des critères de rentabilité commerciale, spécialement en pays à main-d'œuvre chère, car le procédé proposé est très gourmand en main-d'oeuvre du fait de son taux de mécanisation quasiment nul.

Nous pratiquons la culture de spiruline à petite échelle depuis 1991, dans le but de la mettre à la portée de ceux qui en ont vraiment besoin. Nous souhaitons que ce document, essentiellement basé sur notre expérience personnelle et celles de quelques collègues travaillant de manière similaire, puisse vous initier, guider vos premiers pas dans ce nouveau type de culture.

Nous vous conseillons de démarrer votre culture à petite échelle, pour vous faire la main, mieux appréhender des phénomènes naturels somme toute très simples, et manipuler des outils de travail qui vous seront d'autant plus familiers que vous les aurez faits vous-même.

Ajoutons que sans pouvoir garantir la qualité de la spiruline produite dans tel lieu, sous tel climat, dans telles conditions, nous pouvons affirmer n'avoir jamais eu connaissance d'un cas de toxicité d'une spiruline produite artisanalement sous les latitudes (entre 0 et 45°) où nous avons travaillé.

1) QU'EST- CE QUE LA SPIRULINE ?



C'est un petit être aquatique (0,3 mm de long), vieux comme le monde dont le nom scientifique est "cyanobactérie Arthrospira platensis" (ne pas confondre avec la cyanobactérie marine dénommée scientifiquement "Spirulina subsalsa"), qui vit de photosynthèse comme les plantes et prospère naturellement dans les lacs salés et alcalins des régions chaudes du globe. Nourriture traditionnelle des Aztèques du Mexique et des Kanembous du Tchad, plus riche en protéines que la viande, la spiruline est maintenant cultivée dans de grandes usines aux U.S.A., en Inde, en Chine, en Thaïlande, etc., car on lui découvre toujours plus de qualités intéressantes pour l'alimentation et la santé, tant pour les hommes que pour les animaux. Par exemple un enfant souffrant de kwarshiorkor (malnutrition) peut être rétabli en lui donnant une cuillérée par jour de spiruline pendant un mois. La spiruline renforce les défenses immunitaires et allège les souffrances des personnes atteintes du Sida. Elle permet aux tuberculeux de mieux supporter leur traitement.

Dans la nature, la spiruline n'a besoin pour "pousser" que d'une cuvette argileuse retenant une eau saumâtre et alcaline, sous un climat chaud, et de quelques déjections animales. Les flamants roses "minor" (les plus nombreux) fournissent l'apport en déjections et l'agitation nécessaire pour assurer la croissance de la spiruline naturelle qui est leur aliment exclusif.

La spiruline se présente sous forme de filaments constitués de cellules juxtaposées. La reproduction de la spiruline, asexuée, se fait par division des filaments.

La culture industrielle de la spiruline est intensive et très technique. Son produit final, séché

par atomisation, est inférieur en qualité au produit frais, et même au produit séché artisanalement, et ne plait pas à de certains consommateurs qui lui trouvent une odeur forte. De plus il n'est pas à la portée des populations qui en ont le plus besoin.

Pour des détails sur les caractéristiques, les vertus, la fabrication industrielle et le marché de la spiruline, nous vous renvoyons aux ouvrages les plus récents disponibles sur ces sujets, dont le classique "Earth Food Spirulina" de Robert Henrikson, édité par Ronore aux U.S.A (1997) et ceux de Jacques Falquet : "Spiruline, Aspects Nutritionnels", Antenna Technologie, Genève (1996) http://www.antenna.ch/aspectsNutri.htm, de Ripley D. Fox : "Spiruline, Production & Potentiel", Editions Edisud (1999), sans oublier "Spirulina Platensis (Arthrospira), Physiology, Cell biology and Biotechnology", d'Avigad Vonshak, aux Editions Taylor & Francis (1997). "Earth Food Spirulina" est maintenant disponible sur http://www.spirulinasource.com/ avec mise à jour permanente. L'usine hawaïenne est décrite dans http://www.cyanotech.com/.

La plus grande usine chinoise Yunnan Spirin Co est décrite dans http://www.chinapages.com/yunnan/kunming/spirin/spirin_i.html et http://www.luf.org/~melrod/fp3/spiru.htm.

Voir aussi évidemment les publications d'Antenna Technologie sur www.antenna.ch.

2) INFLUENCE DU CLIMAT

Les deux paramètres fondamentaux qui contribuent à constituer le climat sont les températures et la pluviométrie. Il ne faut pour autant pas négliger les vents dominants, par exemple le mistral en vallée du Rhône, qui peuvent avoir des conséquences importantes sur l'évaporation d'un bassin de culture, sur la température de l'eau ou la "pollution" de ce bassin par tous les débris et les poussières qu'il peut entraîner.

De même certains éléments comme les haies, la présence de barres rocheuses, de forêts, etc. peuvent entraîner des conséquences importantes sur le microclimat, conséquences qu'il sera bon d'évaluer avant l'implantation d'un bassin... comme d'un jardin potager.

2.1) Température

Les premiers repères concernant les températures sont à peu près les mêmes que pour l'homme, 37° C : température idéale pour pousser. Au-dessus, c'est trop chaud. En dessous, la vitesse de multiplication baisse avec la température. A 20° C la croissance est pratiquement stoppée. La température du milieu de culture doit donc se situer entre ces deux températures. Plus la "saison" est longue, plus la période de récolte est longue. Les climats continentaux ou d'altitude sont désavantagés.

Le handicap d'un climat trop froid peut être compensé artificiellement, comme pour tous les végétaux. La construction de bassins sous serre peut être d'autant plus intéressante que cet abri constitue non seulement une protection contre le froid, l'évaporation, les insectes et les poussières mais aussi contre les pluies diluviennes, comme les orages, qui peuvent faire déborder les bassins et donc provoquer une perte, ou au moins une dilution du milieu de culture.

2.2) Pluviométrie

La conduite de bassins de culture nécessite un minimum de ressources en eau. Les eaux de pluie sont intéressantes car propres et neutres (pas de minéraux en solution). Sous les climats à faible pluviométrie, ou à saison sèche longue, il peut être nécessaire de prévoir une citerne pour stocker de l'eau de pluie et compenser ainsi l'évaporation des bassins. Là encore, il faut un "juste milieu". Les excès de précipitations devront être prévus en construisant des bassins plus profonds ou en les protégeant. Le manque d'eau est évidemment rédhibitoire. La carence en eau de pluie peut être compensée par l'utilisation d'eaux de provenances diverses, et plus ou moins "chargées" (rivière ou fleuve, nappe phréatique, eaux usées...). Il faudra alors tenir compte de la qualité de l'eau dans la mise au point, puis l'entretien du milieu de culture.

La présence d'une couverture translucide au-dessus des bassins pour éviter une dilution du milieu de culture est une bonne solution dans les régions à fortes précipitations (cf. § 3.2 BASSINS.htm - Couverture)

2.3) Climat idéal

Il existe des climats idéaux où il ne fait jamais froid et où les pluies sont harmonieusement réparties et compensent l'évaporation, comme par exemple certains points du versant Est des Andes. Un autre type de climat idéal est le désert au pied de montagnes qui assurent un large approvisionnement en eau, comme par exemple le désert d'Atacama au Chili. L'eau consommée par un bassin sert surtout à maintenir la culture en dessous de 40° C, par évaporation. Dans un climat désertique sans eau la culture est impossible (sauf à importer de l'eau), alors que dans un climat frais la culture sous serre est facile avec une faible consommation d'eau.

2.4) Saisonnalité (Voir Annexe Hivernage A.htm - A25)

Dans les régions tempérées, l'hiver est généralement trop froid pour cultiver la spiruline, sauf avec chauffage et éclairage artificiels trop coûteux. Même dans des régions chaudes un arrêt annuel peut être rendu nécessaire par l'importance des pluies ou de la sécheresse ou par les vents de sable à certaine saison.

La culture de spiruline sera donc souvent saisonnière.

Durant la mauvaise saison, une "souche" de spiruline devra impérativement être conservée dans son milieu de culture. Les contenants (bocaux, bonbonnes, bassines) devront laisser passer la lumière et être stockés dans un lieu clair mais à l'ombre, ou être sous éclairage électrique. Même si les cultures de spiruline survivent à des températures inférieures à 10° C, voire à de brèves gelées, il est prudent de ne pas les stocker au-dessous de 18° C pendant de longues périodes, car les risques de contamination augmentent.

Le fait que la spiruline prospère en milieu très alcalin présente deux avantages majeurs :

- meilleure absorption du gaz carbonique de l'air

- protection contre les contaminations.

Cette protection nous a été involontairement démontrée au printemps 1997. Nous avions côte à côte deux bassins de spiruline de 10 m², l'un à l'air libre, l'autre protégé de la pluie. Le bassin non protégé ayant débordé a été vidangé et s'est rempli d'eau de pluie, laquelle a été colonisée par des algues vertes unicellulaires (chlamydomonas) et nombre d'animaux (vers rouges, larves de moustiques, insectes nageurs). L'autre bassin a gardé ses spirulines sans contamination. Cependant il ne faut pas croire que seule la spiruline peut croître dans son milieu de culture : d'autres algues, des microorganismes et des animaux peuvent y vivre, d'où nécessité de surveiller les cultures du point de vue contaminants, surtout aux changement de saisons.

3) BASSINS

Où implanter les bassins ? Il faut respecter quelques règles pas toujours évidentes : pas sous des arbres, ni en un lieu inondable, ni près d'une route ou d'une industrie (pollution). A l'abri des curieux, souvent ignorants et pas toujours bien intentionnés. Un terrain plat facilitera le travail, de même que la proximité de l'eau, etc. Il vaut la peine de réfléchir avant de décider.

3.1) Construction des bassins de culture

Pour une production familiale ou artisanale on peut se contenter de bassins de petite taille, sans agitation à roue à aube, sans chicane médiane. Il y a alors de nombreuses façons de construire un bassin adéquat, variables selon les conditions locales.

Le bassin ne doit pas comporter d'angles vifs, mais des formes arrondies (au moins aux extrémités dans le cas de bassins rectangulaires). Le fond doit être aussi plan que possible, avec une très légère pente vers un endroit plus creux d'accès facile (pour faciliter la vidange). Les bords du bassin doivent être au-dessus du niveau du terrain, pour réduire l'entrée des poussières et des animaux, et au moins 20 à 40 cm au-dessus du fond : mieux vaut prévoir une profondeur assez forte, pour encaisser les pluies, faciliter les transferts entre bassins et l'autoépuration biologique du milieu de culture. Les bassins, surtout les plus profonds, doivent faire l'objet de précautions pour éviter l'accès des petits enfants. Il faut aussi faire en sorte qu'on ne puisse pas confondre les bassins avecun dépotoir, mésaventure qui est malheureusement arrivée dans plusieurs pays.

Une des plus grosses difficultés pour réussir un bassin est l'aplanissement du fond : en fait c'est là où réside surtout la limitation en surface pour un artisan ne disposant que d'outils ordinaires (pioche, rateau, règle et niveau à bulle).

Une variante, qui ne sera pas décrite ici car peu adaptée aux conditions artisanales, consiste à faire la culture en lame d'eau coulant sur un plan incliné.

3.1.2) En bâches plastique

Une épaisseur de film de 0,5 mm minimum est recommandée. Le film (PVC, polyéthylène, EVA, tissu enduit PVC ou PP, caoutchouc EPDM), de qualité alimentaire et résistant aux ultraviolets, peut être simplement fixé sur un cadre en bois ou en tubes d'acier ou de PVC, ou soutenu par un muret en planches, briques, parpaings (même non cimentés), terre crue stabilisée (pisé,"banco"). En fait la solution muret en dur ou au moins en bois est nécessaire en cas de risque d'attaque par des rongeurs. Eviter le plus possible les plis dans les angles donnant des zones qui ne seraient pas bien agitées ou aérées. Il est recommandé de cimenter le sol supportant le bassin ou de le couvrir d'une couche de gravier et sable ou latérite broyée bien damée. Si l'on doit utiliser du film plastique plus mince, le protéger du contact direct avec le sol et la maçonnerie, par exemple avec un feutre type "géotextile" ou deux ou trois couches de film usagé. Il existe un film PVC, de qualité alimentaire, de 1,2 mm d'épaisseur et 2 m de large pouvant être assemblé par soudure avec un pistolet à air chaud spécial (nécessite de l'électricité). Le film de caoutchouc EPDM, qui peut se coller, est une bonne solution mais de luxe. Les films épais et soudables ou collables réduisent les plis et facilitent l'installation d'une chicane centrale pouvant être simplement soudée ou collée au fond du bassin, mais ces films ont tendance à rester hors de portée des petits producteurs.

Pour la pose, tenir compte du fort coefficient de dilatation thermique des films plastique (en cas de pose par temps chaud, il y aura rétractation importante par temps froid, et vice-versa).

En cas d'utilisation d'un film de qualité inconnue, le faire analyser pour vérifier qu'il est alimentaire et faire un essai de culture pour vérifier qu'il n'est pas toxique et qu'il résiste au milieu de culture (cf BASSINS.htm - qualité).

S'il y a des termites un lit de sable sur une couche de cendres sous le plastique et d'utiliser un muret en dur, ou au moins de traiter le bois, à moins que l'on ne dispose d'un bois naturellement inattaquable ; on peut aussi poser le film sur une dalle d'argile séchée ou mieux de ciment, ou le protéger par du métal. A noter que le chiendent africain est capable de percer le plastique. Il arrive que le plastique ne fuie pas même s'il est percé d'un petit trou, qui se bouche spontanément.

Il est possible de réparer un petit trou avec un mastic noir collant (à sec) vendu dans le commerce à cet effet, ou même avec une "rustine" de ruban adhésif résistant à l'eau.

Les rongeurs peuvent être de redoutables dangers pour les bassins en film plastique non protégé. Pendant des années je n'ai pas eu ce problème à Mialet, puis dans l'hiver 2000-2001 (très doux) 4 bassins ont été percés de multiples trous sur les bords non protégés. Il existe des appareils électriques repoussant efficacement les rongeurs.

Pour vidanger et nettoyer un bassin constitué d'une bache plastique supportée par un muret en dur, un moyen facile est d'abaisser le bord de la bâche près du point de vidange (puisard).

Photo d'un bassin en tissu polyamide enduit PVC, Ecopark, Madurai, Tamil Nadu (Inde), 18 m² , 1998 :



3.1.3) En "dur" (béton, parpaings, briques)

Le fond d'un bassin en ciment doit être construit sous forme d'une dalle en béton armé de 10 cm d'épaisseur minimum, de très bonne qualité, sur terrain bien compacté. Les bords du bassin peuvent être en briques, en parpaings ou en béton armé. Eviter les angles vifs. Soigner l'enduit d'étanchéité (un adjuvant imperméabilisant ou une peinture epoxy sont pratiquement indispensable, ou sinon peindre l'enduit ciment à la chaux). Il est bon d'attendre quelques jours, bassin plein d'eau, avant d'ensemencer en spirulines (sinon l'alcalinité de la chaux ou du ciment frais peut jaunir très rapidement les spirulines). Il existe des techniques pour construire des bassins de grande longueur (50 à 100 m) sans joint de

dilatation. Le mariage béton-film plastique est aussi une solution, soit que le film double le béton pour l'étanchéiser, soit qu'une partie du bassin soit en film plastique et l'autre en béton (avec raccordement béton-film comme l'a pratiqué avec succès Bionor au Chili).

Photos :

- Chez les Pères Camiliens à Davougon (Bénin), 8 m² , 1994 :



- Dans un village près de Maduraï , Tamil Nadu (Inde), 1 m² , 1996 :



3.1.4) En argile (si on n'a vraiment pas d'autre possibilité)

Creuser sur 20 cm et faire un talus bien tassé de 20 cm également. Si le terrain n'est pas naturellement argileux, garnir la surface d'une couche d'argile humide de bonne qualité, de 3 à 5 cm d'épaisseur, bien

tassée pour éviter les fissures. Garnir les rebords de tuiles ou briques cuites, ou de plastique pour éviter les fissurations lors des baisses de niveau. La spiruline pousse très bien dans un bassin en argile, mais sa pureté bactériologique doit être surveillée de plus près (risques accrus de présence de microorganismes anaérobies au fond). L'étanchéité n'est pas complète, mais elle peut être améliorée avec un film plastique même très mince.

3.2) Couverture du bassin de culture

En l'absence de toute protection sur le bassin, une alimentation carbonée (cf. § 7.8 CULTURE.htm - Carbone), et une bonne agitation sont recommandées ; une bonne disponibilité d'eau (pour compenser l'évaporation), l'absence de pluies diluviennes (pluies de plus de 200 mm/jour) et de basses températures sont par ailleurs nécessaires.

Il est en fait souvent utile, voire nécessaire, d'installer une serre ou au moins un toit sur le bassin, permettant de le protéger contre les excès de pluie, de soleil ou de froid, et contre les chutes de feuilles, fientes d'oiseaux, vents de sable et débris divers, tout en lui permettant de "respirer". Le toit peut être en toile de tente blanche ou en tissu polyamide enduit PVC blanc laissant passer une partie de la lumière mais capable d'arrêter suffisamment la pluie. Il peut aussi être en plastique translucide : film de polyéthylène traité anti-U.V. utilisé pour la construction des serres horticoles, ou plaques en polycarbonate ou fibre de verre-polyester. Si le toit est opaque, il faut le mettre suffisamment haut pour que le bassin reçoive assez de lumière par les bords. Le toit est parfois complété par une moustiquaire sur les bords et/ou les côtés. Si la pluie est tolérable, le toit peut être remplacé par un simple ombrage (filet ombrière, canisse, feuilles de palmier tressées). Le toit peut être flottant si le bassin est trop large pour qu'on puisse construire une structure fixe pour le supporter.

Installer une serre consiste à recouvrir le bassin d'un film translucide avec une pente et une tension ou des supports suffisants pour éviter la formation de poches d'eau de pluie et résister aux tempêtes. Le film peut être supporté par des montants rigides ou des fils de fer ou du grillage (par-dessous et aussi parfois par-dessus). Des orifices d'aération et/ou d'accès doivent être prévus. Il est généralement nécessaire de prévoir aussi un dispositif d'ombrage (filet ombrière en plastique tissé noir par exemple, de préférence par dessus le plastique translucide). Le bois non traité et l'acier galvanisé sont des matériaux convenables pour les structures de serre. Eviter les vis cadmiées (à reflets jaunes). Poser et tendre le film par temps chaud pour éviter qu'il ne se détende par temps froid.

Un mode de réalisation économique d'un bassin sous serre consiste à faire un muret en éléments rigides (parpaings ou briques cimentés ou non, planches vissées sur des piquets en acier, bottes de paille), à poser le film d'étanchéité en recouvrant le muret et en l'enterrant sur les bords puis à tendre par-dessus un film de serre lui-même enterré sur les bords. Une légère pente (4 %) du film de serre suffit pour que même par pluies très violentes l'eau ruissellle sur le film sans s'y accumuler, à la condition expresse que le film soit tendu comme une peau de tambour ou un tissu de parapluie ; la pente peut être fournie par des poutres ou chevrons en bois formant comme une charpente basse sur le bassin. N.B. : avec une faible pente, il est probable que la serre ne résistera pas à une chute de neige ou de grêle limportante. Pour accéder à un tel bassin et l'aérer il est nécessaire d'installer en au moins un point (mais de préférence deux) une "porte" d'accès, simple cadre vertical sur lequel repose le bord du film qui reste non enterré à cet endroit ; la porte peut être fermée par une moustiquaire (non seulement contre les insectes mais aussi les feuilles mortes). Prévoir la construction pour que la composante horizontale de la tension du film ne fasse pas basculer le muret.

Le mode de réalisation le plus économique d'un bassin sous serre utilise le même film (film de serre) pour le fond, les côtés et la couverture. Avec un film de serre de largeur standard (6,5 m) on réalise facilement des bassins jusqu'à 30 m² . Le faîte pet être un chevron en bois de 6 x 8 cm, de 5 m de long

fixé à environ 1,5 m de haut. Le film est agrafé sur le faîte d'un côté, puis de l'autre avant d'être fixé par liteaux sur le faîte. Aux deux extrémités on place un rebord en planches ou parpaings sur lequel est relevé et fixé solidement le bord du film, et on aménage deux "portes" d'accès à munir de moustiquaires. Le coût des matériaux s'élève à 5 $/m² si la sous-couche de protection est réalisée en film plastique de récupération (usagé), hors ombrage, protection latérale et agitation. Une protection latérale est en fait recommandée contre les dommages causés notamment par les animaux : la placer à au moins 50 cm des bords si elle est en matériau brut pouvant endommager le film lors de ses déplacements par grand vent. Pour assurer la stabilité par grand vent, remplir le bassin d'au moins 20 cm. Exemple de réalisation en 20m² (Mialet, 2000) :



L'utilisation de film de serre pose le problème de sa qualité du point de vue alimentaire. Il convient de vérifier que la spiruline cultivée à son contact ne va pas être polluée. Certains films (ceux qui sont légèrement jaunes) sont stabilisés contre les UV par un composé à base de cadmium. D'après nos analyses le cadmium ne migre pas du plastique vers le milieu de culture et ne pollue pas la spiruline.

Un bassin sous serre suffisamment étanche présente l'avantage de pouvoir être alimenté en gaz carbonique provenant de la combustion de gaz ou d'une fermentation (compost) grâce à son atmosphère contrôlable.

Une serre ombrable et aérable est idéale en tous climats car elle permet un contrôle maximum tant de la température, de la lumière, de la pluie et de l'évaporation que des insectes et autres animaux, poussières, feuilles mortes ; elle est la protection la plus efficace pour réduire le plus possible la consommation d'eau en climat aride.

Photos:

- Bassins de 50 m² sous serre chez José Vitart, Mialet, 1998 :



- Bionor, près de La Serena, Valle de Elqui (Chili), 1997 :



3.3) Nombre et surface de bassins

Mieux vaut construire deux ou plusieurs petits bassins qu'un seul grand : ainsi on pourra en vider un (pour le nettoyer ou le réparer par exemple) sans perdre son contenu, et si une des cultures se contamine, n'est pas en bonne santé ou meurt, l'autre permettra de continuer et de réensemencer. Il peut être aussi pratique de puiser dans un bassin pour filtrer sur un autre. Un bassin de service est par ailleurs utile pour préparer les milieux de culture et effectuer des transvasements, ou pour évaporer des purges en vue de recycler les sels, mais il n'est pas absolument nécessaire.

Un m² de bassin couvre le besoin en spiruline d'une à 5 personnes selon la dose. Le coût d'investissement au m² décroît quand augmentent la surface unitaire et le rapport surface/périmètre des bassins. Par contre des bassins étroits (largeur inférieure à 3 m) sont plus faciles à agiter et à couvrir. Une surface unitaire de 10 à 20 m² parait pratique au niveau familial ou pour un dispensaire. Pour une production artisanale la surface totale des bassins ne dépassera guère 50 à 100 m², mais un niveau "semi-artisanal" est envisageable, pouvant dépasser 1000 m² (A.htm - A28).

3.4) Agitation du bassin

L'agitation est nécessaire pour homogénéiser, favoriser l'élimination de l'oxygène et assurer une bonne répartition de l'éclairage parmi toutes les spirulines. Sauf en cas de soleil très fort, on peut se contenter d'agitations plus ou moins fréquentes (quelques minutes toutes les heures, au moins 4 fois par jour), manuelles avec un balai ou une rame, ou par pompes n'endommageant pas les spirulines (pompes à hélice, vis, palettes, diaphragme ou vortex). Une pompe d'aquarium à entrainement magnétique de 800 l/h, 8 Watt, fonctionnant 15 minutes par heure ou par demi-heure (programmateur à horloge), suffit pour agiter 5 à 10 m² de bassin si elle est bien positionnée (orientation de son jet en site et en azimuth) et si les bords du bassin sont réguliers et ses angles arrondis. Une chicane médiane peut faciliter la circulation, mais il faut en général la compléter par des chicanes d'angles redirigeant les flux des bords vers le centre, ce qui complique l'installation : dans un petit bassin de dimensions bien choisies la chicane centrale est totalement inutile. L'installation d'une chicane médiane dans les bassins en bâche plastique (recouvrant la chicane) pose le problème des plis qu'il faut éviter au maximum. Ce problème est minimisé si la chicane est de faible hauteur (20 cm) et ses extrêmités arrondies. Mais certains préfèrent des chicanes (en bois par exemple) posées par dessus la bâche ; dans ce cas il faut veiller à minimiser le by-pass sous la chicane.

Nettoyer de temps en temps les crépines des pompes et les recoins du corps des pompes (je préfère enlever le capot qui ne sert qu'à enjoliver les pompes d'aquarium). Avec les souches ondulées les pompes vide-cave ordinaires sont utilisables sans risque de casser les filaments ; une telle pompe peut agiter un bassin carré ou rond de 50 m² ; mais ces pompes ne sont pas à entrainement magnétique et comportent donc un joint, ce qui peut provoquer des problèmes d'étanchéité et de corrosion au bout d'un certain temps). Attention : les pompes en 220 Volt nécessitent des précautions pour éviter de s'électrocuter, surtout en serre humide (les constructeurs de pompes d'aquarium demandent qu'on débranche avant de toucher l'eau) ; il est recommandé de brancher le système d'alimentation électrique sur un transformateur "à écran d'isolement" relié à la terre (système utilisé pour les prises de rasoirs dans les salles de bains) ; on peut compléter la sécurité par un disjoncteur différentiel de 30 mV. Des pompes en 12 ou 24 Volts sont préférables.

Mieux vaut une agitation discontinue énergique que continue mais faible. Même une agitation énergique sera plus efficace si elle est intermittente car à chaque redémarrage il se produit un brassage, alors qu'en continu la masse d'eau a tendance à se déplacer d'un bloc (sauf si des chicanes sont installées en travers du courant). C'est une bonne pratique d'agiter au balai le bassin au moins une fois par jour, surtout s'il est assez profond.

Les grands bassins industriels, très longs, sont toujours munis d'une chicane médiane et agités par roue à aubes (cf. Annexe A.htm - A24). Leur surface unitaire maximum est de 5000 m² .

Les cultures en lame d'eau sur plan incliné (cf. § 3.1) sont agitées par la turbulence due à l'écoulement.

Un mode d'agitation nouveau a été proposé récemment par François Haldemann : la cloche à air comprimé. Il s'applique bien aux petits bassins assez profonds, de préférence ronds. Il consiste à faire arriver un débit d'air comprimé (d'un compresseur d'aquarium) sous une cloche lourde posée au fond du bassin (un plat en Pyrex fait bien l'affaire) : la cloche se soulève d'un côté, à intervalles réguliers, en produisant une grosse bulle d'air ; en retombant la cloche provoque un certaine circulation du liquide. J'ai équipé ainsi un bassin rond de 7 m² avec un compresseur de 300 l/h en marche continue : l'agitation est bonne. Un avantage important de ce mode d'agitation est l'absence de fils électriques. Dans la pratique ce mode d'agitation est limité aux bassines ou petits bassins mais peut rendre de vrais services.

Photos :

- Agitation par petite pompe d'aquarium dans un bassin de 22 m² au Foyer de Charité de Bangui (RCA), 1995 :



- Agitation par mini roue à aubes dans un bassin de 50 m² chez José Vitart à Mialet, 1997 :



3.5) Containers, bassines, gaines

Il arrive que l'on utilise comme petits bassins des récipients translucides comme des bouteilles, bonbonnes, bassines, gaines en film plastique, containers à jus de fruits (il en existe de 1000 litres). Il faut savoir que la vitesse de photosynthèse paraitra plus rapide dans de tels récipients parce que le milieu de culture y reçoit la lumière de plusieurs côtés et s'échauffe aussi plus vite. Cela peut être avantageux, mais il faut surveiller la température et le pH de plus près que dans les bassins ordinaires.

L'agitation dans de tels récipients se fait de préférence par air comprimé (compresseur d'aquarium).

N.B. Il s'agit là en fait de variantes de "photobioréacteurs" à grand rapport surface/volume.

3.6) Réparation des films plastique

Il est possible de réparer de petits trous dans les films : nettoyer et sécher une zône autour du trou puis y coller un produit mou et collant (de qualité alimentaire) vendu à cet effet, ressemblant à du chewing gum. Le PVC peut aussi être réparé par rustines collées ou soudées, ou par une bande adhésive résistant à l'eau. Certaines bandes adhésives s'appliquent aussi aux films de polyéthylène. Attention : utiliser des produits de qualité alimentaire.

* * *

4) MILIEU DE CULTURE

4.1) Préparation du milieu de culture

Les spirulines vivent dans une eau à la fois salée et alcaline. L'eau utilisée pour le milieu de culture doit être de préférence potable (mais ne sentant pas fortement le chlore) ou au moins filtrée (sur bougie filtrante ou sable), le plus important étant l'élimination des algues étrangères. L'eau de pluie, de source ou de forage est en général de qualité convenable. Si l'eau est dure, il se produira des boues minérales (plus ou moins abondantes selon la teneur en calcium, magnésium et fer), qui décantent rapidement et ne sont pas particulièrement gênantes pour la culture, à condition toutefois que l'ensemencement initial en spirulines soit assez concentré.

Les limites de salinité et d'alcalinité (= basicité) permises sont assez larges mais on se place en général vers les minima, pour des raisons d'économie (sauf si la source d'alcali est très bon marché), avec une salinité totale de 13 g/litre et une basicité de 0,1 molécule-gramme/litre (b = 0,1) ; mais ces concentrations peuvent être doublées sans inconvénient. Il peut même être avantageux de travailler à une basicité double pour atténuer les fluctuations de pH dans l'après-midi, surtout en surface ou dans les angles du bassin quand l'agitation est déficiente. Lorsque le carbone est apporté par le bicarbonate on a intérêt à travailler à forte alcalinité (0,2) pour réduire le volume des purges, et ça ne coûte pas plus cher. Un cas où b = 0,2 est préféré est celui du bassin ouvert démarré en saison sèche : la dilution par la pluie ramènera b à 0,1 ou même en dessous pendant la saison des pluies.

L'alcalinité est habituellement apportée par du bicarbonate de sodium, mais ce dernier peut être remplacé en partie par de la soude caustique ou du carbonate de sodium pour relever le pH initial du milieu de culture (par exemple 5 g/l de bicarbonate + 1,6 g/l de soude donnent un pH de 10) ; le carbonate ou la soude peuvent même être la seule source d'alcalinité à condition de les bicarbonater au gaz carbonique ou par exposition à l'air avant usage (cf. N.B. du § A16.1 : A.htm - soude pour la dose limite de soude). Le natron ou trona peuvent aussi être utilisés (cf natron). La salinité complémentaire est apportée par les différents engrais et du sel (chlorure de sodium). Le sel de cuisine iodé et fluoré peut convenir mais souvent il contient jusqu'à 2 % de magnésie insoluble : mieux vaut utiliser un sel n'en contenant pas ; par contre l'emploi d'un sel peu raffiné est recommandé à cause de sa teneur en oligo-éléments. Si le sel apporte trop de magnésium, il y aura floculation de sels minéraux insolubles, surtout à pH assez élevé, ce qui peut être très gênant pour une culture qu'on ensemence peu concentrée en spiruline : celle-ci est en effet facilement entraînée par les flocs et tombe au fond sans qu'on puisse la récupérer. C'est aussi une raison qui milite pour ne pas ajouter de calcium en début de culture nouvelle.

En plus du sel et de la soude, le milieu de culture contient des engrais pour assurer la croissance des spirulines comme en agriculture habituelle : azote (N), phosphore (P), potassium (K) sont les trois principaux éléments, mais soufre (S), magnésium (Mg), calcium (Ca) et fer (Fe) doivent aussi être ajoutés s'ils ne sont pas apportés en quantité suffisante par l'eau, le sel et les engrais. Une analyse de l'eau et du sel est utile pour calculer la dose

de Mg, Ca et Fe à ajouter car un excès de ces éléments est nocif (perte de phosphore, formation de boues). L'eau, le sel et les engrais apportent généralement assez d'oligoéléments (bore, zinc, cobalt, molybdène, cuivre, etc.).

Les sources d'azote préférées des spirulines sont l'ammoniac et l'urée, mais ces produits sont toxiques au-delà d'une concentration limite à respecter impérativement (l'urée s'hydrolyse peu à peu en ammoniac). C'est pourquoi on préfère souvent, au moins lors de la préparation du milieu de culture, utiliser un nitrate dont on peut mettre une forte dose, constituant une réserve d'azote à long terme. Les spirulines consommeront d'abord l'ammoniac ou l'urée s'il y en a de disponibles. Une légère odeur passagère d'ammoniac révèle qu'on s'approche de la limite autorisée ; une odeur persistante et forte indique qu'on l'a sûrement dépassée et qu'il faut s'attendre à un mauvais état de la culture (passager ou irréversible selon la dose d'ammoniac).

L'urée est le nom commun du carbamide ; certaines personnes confondant urée et urine, et éprouvant de la répugnance à manger de la spiruline fabriquée avec de "l'urée", il peut être préférable de remplacer pour elles le terme "urée" par son synonyme scientifique "carbamide".

Le nitrate n'est pas réellement sans risque car il peut se transformer par réduction chimique en ammoniac (en présence de sucre par exemple et sans doute d'exopolysaccharides sécrétés par la spiruline elle-même). Vice-versa l'ammoniac (issu de l'urée par exemple) peut s'oxyder en nitrate.

Le phosphore est apporté indifféremment par n'importe quel orthophosphate soluble disponible, par exemple le phosphate monoammonique ($NH_4H_2PO_4$), le phosphate dipotassique (K_2HPO_4) ou le phosphate trisodique (Na_3PO_4, 12 H_2O), ou encore l'acide phosphorique lui-même. De même le potassium peut être apporté indifféremment par le nitrate de potassium, le chlorure de potassium, le sulfate ou le phosphate dipotassiques. La source de magnésium habituelle est le sulfate de magnésium appelé sel d'Epsom ($MgSO_4$, 7 H_2O). Le calcium éventuellement nécessaire est apporté par un peu de chaux ou de plâtre, ou, mieux, d'un sel de calcium soluble (nitrate, chlorure); il faut en mettre de quoi saturer le milieu en calcium à pH voisin de 10, mais pas plus, c'est-à-dire jusqu'à formation d'un léger louche blanc. En cas d'ensemencement d'une nouvelle culture avec peu de spiruline, mieux vaut s'abstenir d'ajouter du calcium au début pour éviter de perdre de la semence par entrainement par les boues minérales.

On notera la possibilité d'apporter plusieurs éléments à la fois par le même produit, par exemple N et K par le nitrate de potasse, P et K par le phosphate dipotassique, ou S et Mg par le sulfate de magnésium.

Le fer est généralement apporté par une solution de sulfate de fer acidulé, et de préférence associé à un chélatant (voir § 7.6 CULTURE.htm - chélatant).

Ne pas utiliser les engrais agricoles ordinaires prévus pour être peu solubles (et contenant

de nombreuses impuretés), mais seulement les engrais solubles (voir § 6.1, N.B. e et f granulés) ou les produits chimiques purs correspondants. En cas de doute, analyser la spiruline produite pour vérifier qu'elle ne contient pas trop de métaux lourds.

Les limites de concentration admissibles pour les différents éléments dans le milieu de culture sont données en Annexe 18 (A.htm - A18). Voici un exemple d'analyse de milieu de culture dans un bassin en cours de production :

Carbonate = 2800 mg/l

Bicarbonate = 720 mg/l

Nitrate = 614 mg/l

Phosphate = 20 mg/l

Sulfate = 350 mg/l

Chlorure = 3030 mg/l

Sodium = 4380 mg/l

Potassium = 642 mg/l

Magnésium = 10 mg/l

Calcium = 5 mg/l

Ammonium + ammoniac = 5 mg/l

Fer = 1 mg/l

Salinité totale = 12792 mg/l

Densité à 20° C = 1010 g/l

Alcalinité = 0,105 N (molécule-gramme/l)

PH à 20° C = 10,4

Le milieu doit contenir en plus tous les oligoéléments nécessaires, apportés généralement par l'eau et par les impuretés des sels, mais dont il est prudent d'ajouter un complément (voir A.htm - A26). Un peu d'argile peut être un complément utile.

Voici une formule pour milieu de culture neuf (pH proche de 8, cf § 4.7: ph) convenant pour des eaux de faible dureté :

Bicarbonate de sodium = 8 g/l

Chlorure de sodium = 5 g/l

Nitrate de potassium = 2 g/l (optionnel)

Sulfate dipotassique = 1 g/l (optionnel ; 0,1 minimum)

Phosphate monoammonique = 0,08 g/l

Sulfate de magnésium $MgSO_4, 7H_2O$ = 0,16 g/l

Chaux = 0,010 g/l

Urée = 0,015 g/l (ou 0,050 g/l pour extension de culture, par exemple bassin à géométrie variable, cf SEMIS.htm - Géométrie)

Solution à 10 g de fer/litre = 0,1 ml/l

Dans cette formule la chaux peut être remplacée par 0,025 g de nitrate de calcium ou 0,015 g de chlorure de calcium par litre. Le fer peut être apporté par 0,008 g de Fétrilon 13 ou de Ferfol 13, ou par 0,005 g de sulfate de fer $FeSO_4,7H_2O$ par litre de milieu. Si le phosphore est apporté par l'acide phosphorique ou un phosphate sans ammonium, l'urée passe à 0,035 g/l (ou 0,070 g/l en cas d'extension de bassin).

Le nitrate de potassium n'est en fait pas nécessaire, mais il facilite le travail en assurant une réserve d'azote et de potassium. Inversement, si on met du nitrate on peut omettre l'urée. Si on omet le nitrate, le potassium est apporté par le sulfate dipotassique. Si l'eau est assez riche en sulfates, le sulfate dipotassique peut être réduit à 0,1 g/l et si de plus l'on met du nitrate de potassium il peut même omis.

La dose totale de chlorure de sodium + nitrate de potassium + sulfate de potassium dépend de la basicité "b" ; elle est égale à: 12 - (40 x b), en g/l, avec un minimum de 4 g/l. La basicité de 0,1 peut être apportée par 5 g/l de carbonate de sodium ou par 4 g/l de soude, que l'on doit laisser se carbonater avant usage (environ 15 jours à l'air en couche de 15 cm); on peut aussi mélanger le bicarbonate avec le carbonate ou la soude caustique (cf Annexes A12 A.htm - A12 et A13 A.htm - A13 et programme de calcul carbicar.exe). Le sesquicarbonate de sodium $Na_2CO_3.NaHCO_3.2H_2O$, produit naturel appelé "trona" aux U.S.A., peut être utilisé à 8 g/l et donne un pH de 10,2 convenant bien au démarrage d'une nouvelle culture (cf § 4.7: ph). Le natron africain est un trona impur dont l'utilisation tel quel n'est pas toujours recommandée : il faut au moins le filtrer après dissolution et parfois il faut

le calciner et/ou le recristalliser.

Le nitrate du Chili potassique ("salitre potásico", granulés colorés en rose par de l'oxyde de fer), produit naturel, peut remplacer avantageusement le nitrate de potassium en apportant une riche dose d'oligoéléments, ainsi que du soufre et du magnésium (voir analyse en Annexe A16.1 A.htm - salitre). Attention : le Chili exporte aussi du nitrate de potassium purifié et du nitrate de sodium.

Lorsque le milieu contient simultanément les ions ammonium (NH4), magnésium (Mg) et phosphate (PO4), les concentrations de ces ions sont interdépendantes parce que la solubilité du phosphate mixte d'ammonium et de magnésium est extrêmement faible. Pour éviter des déséquilibres, il faut respecter un rapport pondéral sulfate de magnésium/phosphate monoammonique d'environ 2 et maintenir la concentration en ammonium assez faible. Le phosphate mixte insolubilisé reste tout de même disponible pour la spiruline puisqu'il se redissout dès que les conditions le lui permettent, mais s'il y a déséquilibre les concentrations d'un ou deux des trois ions impliqués peuvent être très faibles, ce qui ralentit la croissance et peut même faire mourir la culture (aussi bien par manque de magnésium que de phosphate). Pour plus de détails, voir § 6 NOURRITURE.htm - phos, et le programme de calcul phos.exe. Les cristaux de phosphate mixte se déposent normalement avec les boues, mais il arrive qu'on en trouve en surface dans certaines conditions et même parfois dans la spiruline récoltée. Ceci n'est pas grave. Ces cristaux se redissolvent immédiatement par acidification (comme c'est le cas dans l'estomac !). A noter qu'en l'absence d'ammonium les mêmes phénomènes se produisent avec le phosphate de magnésium lui aussi fort insoluble aux pH > 9.

Précautions pour le stockage de milieu de culture neuf : cf § 4.8 stockage.

4.2) Milieu "Zarrouk" (thèse Zarrouk (1966), page 4 : BIBLIOGRAPHIE.htm - Zarrouk)

Le milieu standard de Zarrouk contient, en g/litre :

$NaHCO_3$ = 16,8; K_2HPO_4 = 0,5; $NaNO_3$ = 2,5; K_2SO_4 = 1,0; NaCl = 1,0; $MgSO_4$, 7 H_2O = 0,2; $CaCl_2$ = 0,04; $FeSO_4$, 7 H_2O = 0,01; EDTA= 0,08; solution A5 = 1,0; solution B6 = 1,0.

Composition de la solution A5, en g/l: H_3BO_3 = 2,86; $MnCl_2$, 4 H_2O = 1,81; $ZnSO_4$, 7 H_2O = 0,222; $CuSO_4$, 5 H_2O = 0,079; MoO_3 = 0,015.

Composition de la solution B6, en g/l: NH_4VO_3 = 0,02296; $K_2Cr_2(SO_4)_4$, 24 H_2O = 0,096; $NiSO_4$, 7 H_2O = 0,04785 ; Na_2WO_4, 2 H_2O = 0,01794; $Ti_2(SO_4)_3$ = 0,04; $Co(NO_3)_2$, 6 H_2O = 0,04398.

4.3) Et si l'on n'a aucun produit chimique ?

Dans ce cas, ou si l'on veut produire une spiruline "100% biologique", utiliser des produits

naturels. Par exemple on peut utiliser du bicarbonate naturel américain, la trona ou le natron ou de la lessive de cendres de bois, et tout le reste peut être remplacé par 4 ml d'urine (cf précautions à prendre et BIBLIOGRAPHIE.htm - Jourdan) par litre, plus le sel et, si nécessaire, du fer (CULTURE.htm - fer). Si l'urine est proscrite on a recours au nitrate du Chili et à la poudre d'os calcinés (le phosphate naturel et le superphosphate contenant trop de cadmium). A noter que malheureusement le nitrate du Chili a été déclaré "non bio" en Europe malgré son origine naturelle.

La cendre de bois utilisée doit être propre (blanche, sans suie) et aussi riche que possible en sels solubles. Les meilleurs bois sont (en Europe) ceux de peuplier, orme, tilleul, bouleau, pin, eucalyptus; les branches sont plus riches que les troncs. En Afrique certaines parties des palmiers sont particulièrement riches en potasse et servent traditionnellement à l'extraction de potasse. Pour fabriquer la lessive de cendre, on utilise par exemple le dispositif suivant: une bassine à fond percé, une couche de cailloux sur le fond, une toile, et 30 à 50 cm de cendre dans la toile; on verse l'eau sur la cendre (environ 5 litres d'eau par kilo de cendre, plusieurs fois) et on la fait percoler à travers la couche de cendre; au début le jus coule concentré et très caustique; s'en protéger car il attaque rapidement la peau et ne doit jamais atteindre les yeux (en cas d'atteinte, rincer immédiatement et abondamment à l'eau). On peut recycler les premiers jus. Jeter la vieille cendre quand elle est épuisée et recommencer avec de la neuve. Attendre une quinzaine de jours que la carbonatation de la lessive se fasse à l'air, dans un bassin d'environ 15 cm d'épaisseur de liquide. Pendant cette période, agiter en remuant de temps en temps. Le temps de carbonatation étant inversement proportionnel à l'épaisseur, si l'on veut aller plus vite il suffit d'étaler la solution en couche plus mince; une autre possibilité pour gagner du temps est de neutraliser avec un peu de bicarbonate (voir Annexe A13 A.htm - A13) ou de gaz carbonique.

Mesurer la salinité (voir Annexe A3 A.htm - A3, courbe 2) ou mieux l'alcalinité (voir Annexe A5 A.htm - A5). Diluer et saler: La dilution normale est à 8 g/l de natron ou sels de cendres (ou bien alcalinité = 0,1), plus 5 g/l de sel de cuisine, mais en cas de pénurie on peut diminuer considérablement la dose de natron ou sels de cendres tout en conservant la salinité totale à 13 g/l en mettant plus de sel. Ne pas oublier de rajouter du fer (cf CULTURE.htm - fer). Pour mieux faire comprendre, voici un exemple donnant un milieu de culture pour 4 m², prêt à être ensemencé:

Lessiver 20 kg de cendres avec 3 fois cent litres d'eau

Carbonater la lessive à l'air quinze jours sous faible épaisseur

Diluer à densité (20° C) = 1,005 avec 300 litres d'eau

Saler avec 3 kg de sel

Ajouter 2 litres d'urine et 80 g de "sirop de fer"

4.4) Renouvellement du milieu de culture

Le milieu de culture doit rester peu coloré et peu trouble pour assurer la meilleure marche. Normalement les bactéries et le zooplancton se chargent de la minéralisation et du recyclage des déchets biologiques. Mais il peut arriver que la production de déchets dépasse leur élimination (surtout dans les bassins à productivité poussée, et/ou pour des hauteurs de liquide faibles) ; il se peut aussi que le milieu s'épuise en oligoéléments ou que la salinité ait tendance à devenir trop élevée (en cas d'alimentation carbonée sous forme de bicarbonate ou d'alimentation en azote sous forme de nitrates) : il faut alors remplacer le milieu de culture ou pratiquer une purge. Cette purge se fait par le fond (par pompage ou siphonnage) en éliminant en même temps des boues ou lors des récoltes. Si les pluies font monter le niveau du bassin au point où il risque de déborder, il faut aussi pratiquer une purge pour faire baisser le niveau. Remettre dans le bassin la quantité de sels contenus dans la purge (sauf ceux dont on veut éventuellement abaisser la concentration). Si on a purgé parce que le niveau était trop haut à cause de la pluie, on ne remet évidemment que les sels, sans eau.

Si un bassin s'avère trop riche en un élément (urée mise en excès par exemple) et si son niveau est suffisamment bas, on peut lui ajouter du milieu neuf privé de l'élément en trop, de manière à diluer celui-ci.

La marche sans renouvellement du milieu de culture pendant plusieurs années est possible si les oligoéléments sont régulièrement apportés et si la productivité n'est pas excessive par rapport à la profondeur de culture (la profondeur exprimée en cm doit être au moins le quadruple de la productivité moyenne exprimée en g/jour/m²). Dans la pratique cependant un certain taux de renouvellement aide à maintenir négligeable la concentration en contaminants éventuels (chimiques ou biologiques) et à assurer l'alimentation en oligo-éléments (par les traces contenues dans l'eau d'appoint ou les sels). Il est sage de tabler au minimum sur un renouvellement tous les 2 kg de spiruline produite par m² de bassin, soit tous les 6 à 18 mois selon la productivité, en une fois ou, mieux, progressivement. Pour ne pas avoir d'ennuis, si on peut se le permettre, il vaut mieux renouveler le milieu tous les 3 mois (= purge de 1 % / jour), mais il faut savoir que ce n'est pas une nécessité.

N.B.: a) La marche sans ou presque sans renouvellement nécessite de surveiller de plus près les contaminants.

b) Le non-recyclage du jus de pressage équivaut à un taux de purge de l'ordre de 0,02 %/jour. Si la moitié de l'azote est apportée par le nitrate, celui-ci apporte à peu près l'alcalinité perdue par cette purge.

4.5) Epuration et recyclage

Il est en principe recommandé, pour des raisons écologiques, de ne pas jeter le milieu purgé dans l'environnement mais soit de l'utiliser en alimentation animale, soit de le laisser s'évaporer à sec dans un bassin à part jouant le rôle de "marais salant", de préférence à

l'abri de la pluie sous serre. Les sels récupérés, semblables au natron naturel, peuvent être purifiés par calcination (attention au bon réglage de la température et à l'apport d'oxygène, pour éviter le charbonnement) ou par recristallisation, et recyclés, mais ceci reste à essayer. Avec l'évaporation à sec, un renouvellement tous les 3 mois nécessite une surface d'évaporation d'un tiers de la surface des bassins.

Autre type de recyclage possible (procédé de F. Ayala) : l'épuration biologique dans un bassin profond de 1 à 2 m. oùle temps de séjour des purges est de 2 à 4 semaines ; le tiers supérieur est agité par bullage d'air ; le milieu purifié est recyclé tel quel (après ajustement à la salinité voulue), avec les spirulines qui s'y développent naturellement. Autre façon de procéder : envoyer les purges dans un bassin "naturel" peu ou pas agité, de surface égale au tiers de celle des bassins actifs, récupérer pour l'alimentation animale les (très belles) spirulines qui s'y développent et recycler le milieu après stérilisation éventuelle. Mais il nous parait plus simple, au niveau artisanal qui nous intéresse ici, de majorer la surface et/ou la profondeur des bassins pour y réaliser l'épuration biologique "in situ", au prix d'une productivité éventuellement un peu plus basse, mais avec un taux de purge du milieu très faible, voire nul. En zône tempérée, le milieu de culture s'autopurifie très nettement pendant l'hivernage.

Autre solution : utilisation comme engrais par épandage agricole ou sur tas de compost. La forte concentration du milieu de culture en sodium est toxique pour de nombreuses plantes, mais pas toutes (par exemple pas pour le cocotier). On peut aussi remplacer dans la formule du milieu de culture la majorité des ions sodium par des ions potassium. L'eau de cendres (cf § 4.3) assez concentrée pour ne pas nécessiter plus de deux ou trois grammes de sel par litre convient. Sinon on peut utiliser un milieu contenant 10 g de bicarbonate de potassium + 2 g de nitrate de potassium + 1 g de sulfate dipotassique + 3 g de sel par litre (le reste comme au § 4.1). Pour obtenir un milieu à pH > 10, on pourra remplacer les 10 g de bicarbonate de potassium par 6 g de bicarbonate de potassium + 2 g de potasse caustique (attention : mêmes précautions de sécurité qu'avec la soude !). Un milieu riche en potassium est au moins deux fois plus cher qu'un milieu riche en sodium, mais il a l'avantage supplémentaire de donner une spiruline qui peut être utile pour certains régimes "sans sodium" ; cet avantage pourrait plus que compenser le petit surcoût du milieu.

4.6) Utilisation de l'eau de mer

Utiliser l'eau de mer pour établir et maintenir une culture de spiruline, sans traitement préalable de l'eau de mer, est possible mais à condition de travailler à un pH régulé avec une grande précision au voisinage de celui de l'eau de mer, ce qui est techniquement trop difficile pour les petits producteurs artisanaux. En effet l'eau de mer contient une quantité excessive de calcium et de magnésium qui, aux pH élevés, provoquent une précipitation abondante de carbonates et phosphates. D'autre part la salinité élevée de cette eau (35 g/l) interdit son emploi comme eau d'appoint pour compenser l'évaporation, sauf si celle-ci est maintenue très faible par utilisation judicieuse de bassins sous serre.

4.7) pH optimum

Le pH optimum d'un milieu de culture neuf à confectionner dépend de son utilisation.

S'il doit être inséminé pour démarrer une nouvelle culture, son pH doit être d'au moins 10 : s'il est trop bas la culture risque de mal démarrrer, avec formation de grumeaux ou précipitation de la spiruline au fond.

Par contre s'il doit servir d'appoint à une culture existante son pH peut être avantageusement voisin de 8, ce qui contribue à maintenir le pH de la culture suffisamment bas par apport de bicarbonate. C'est typiquement le cas des bassins en cours d'extension ("à géométrie variable", cf SEMIS.htm - Géométrie).

4.8) Stockage de milieu de culture neuf

Il n'est pas recommandé de stocker du milieu de culture neuf même à l'abri de la lumière, car il constitue par nature un "bouillon de culture" où pourrait se développer des micro-organismes ou algues indésirables.

* * *

5) ENSEMENCEMENT

5.1) Quelle souche de spiruline utiliser ?

Il existe des spirulines de "races" (souches) différentes, bien qu'elles aient toutes des caractères communs qui les distinguent des autres algues. On reconnaît très vite au microscope ou même à la loupe de fort grossissement (25 fois) si les spirulines sont spiralées ou droites mais il est moins facile de dire de quelle souche il s'agit car les spirulines ont une forte tendance à changer de taille et de forme (spiralée plus ou moins serrée, ondulée ou droite). En présence de formes droites il existe un doute : s'agit-il de spirulines ou d'algues Oscillatoria semblables aux spirulines droites et dont certaines sont toxiques ? Un œil exercé ne peut confondre une droite avec une des Oscillatorias toxiques courantes (CULTURE.htm - étrangères). Un trop fort pourcentage de droites conduit à des difficultés de récolte. Donc prendre de préférence une semence 100 % spiralée, de grande taille, d'un beau vert tirant vers le bleu-vert, filtrant facilement, et à forte teneur (de l'ordre de 1 %) en acide gamma-linolénique. On peut se procurer des souches pures à l'Institut Pasteur ou encore chez Antenna Technologie à Genève. Toutes sont en fait des "Arthrospira platensis spp" selon la dénomination scientifique. Nous appelons "spiralées" les souches dont les filaments sont en "queue de cochon", telle la "Lonar". Nous appelons "ondulées" les souches dont les filaments sont en spirale étirées, telle la "Paracas". Pour faciliter le choix de la souche, voici quelques éléments utiles:

- Les spiralées flottent plus que les ondulées et les droites, ce qui permet éventuellement leur séparation.

- Les spiralées ont plus tendance à former des peaux et grumeaux verts flottants, surtout à pH bas et en l'absence d'ammonium (cf § 7.9 CULTURE.htm - basph), ce qui est un inconvénient.

- La teneur en matière sèche dans la biomasse essorée prête au séchage est plus élevée chez les ondulées et les droites que chez les spiralées.

- La biomasse des spiralées sèche plus vite.

Il n'y a pas de différences de composition ou de valeur nutritionnelle notables entre ces souches, par contre la couleur verte des ondulées est plus sombre; certains préfèrent la couleur et la saveur de l'une ou l'autre souche, mais ceci est affaire de goût personnel.

Les ondulées et les droites ont bien des caractères communs, mais les ondulées ne souffrent pas de la suspicion de ne pas être de "vraies" spirulines.

5.2) Ensemencement à partir d'une quantité importante de semence

Pour ensemencer il suffit de transvaser dans du milieu de culture neuf un certain volume de culture provenant d'un autre bassin en production jusqu'à ce que la couleur devienne verte

(le "disque de Secchi" A.htm - Secchi) ne doit plus se voir à 5 cm de la surface). On ensemence de préférence le soir. On peut réduire le volume à transférer en prélevant du surnageant concentré ou encore en récoltant de la spiruline sans l'essorer (bien la disperser dans un peu de milieu de culture avant de la verser dans le bassin, ceci pour éviter de laisser des grumeaux, ce qui n'est pas facile avec les souches spiralées).

On a toujours intérêt à démarrer aussi concentré que possible en spiruline. C'est pourquoi on démarre avec le niveau minimum de liquide (par exemple 5 à 10 cm) si la disponibilité de semence est limitée. Si la culture commençante est trop diluée ("Secchi" supérieur à 5 cm), il faut ombrer, sinon on risque la mort des spirulines par photoxydation au soleil, et veiller à éviter les dépôts minéraux qui entraînent avec eux des spirulines (pour cela filtrer le milieu neuf avant de l'ensemencer et maintenir l'agitation pendant la nuit si possible). Si le niveau initial est le niveau normal, et si le milieu neuf est à base de bicarbonate, ne pas ensemencer trop concentré non plus, sinon il faudra récolter avant que le pH ait atteint le niveau minimum de 9,6 recommandé (cf § 7.13 CULTURE.htm - hautph) ; mais il est facile de démarrer avec un milieu de culture à pH 9,6 ou plus en mélangeant au bicarbonate du carbonate de soude ou de la soude (cf Annexes A12 A.htm - A12 et A13 A.htm - A13). Un autre avantage d'un pH initial élevé est la réduction de la tendance initiale à la formation de grumeaux avec les souches spiralées, avantage pouvant être décisif quand on a peu de semence : il ne faut pas en perdre en grumeaux !

Il est permis de stocker quelques jours et transporter une semence très concentrée (3 à 4 g/l par exemple, pas plus), à condition de l'agiter et de l'aérer au moins de temps à autre sinon elle fermente et sent mauvais. A 2 g/l, le transport peut durer dix jours. A noter qu'une couche flottante prélevée avec soin peut titrer 5 à 10 g/l. Dans une semence très concentrée le pH baisse et une odeur mercaptée (odeur de choucroute) se développe au cours du temps. Après l'ensemencement avec une spiruline ayant "souffert" au stockage, le nouveau bassin peut mousser excessivement, mais cela disparaît normalement en un à deux jours.

La semence se conserve mieux à basse température, vers 10° C par exemple (réduction de la respiration).

5.3) A partir d'une petite quantité de semence

Pour implanter une culture de spiruline dans un site qui en est dépourvu, ou pour redémarrer avec une nouvelle souche, il n'est généralement pas possible de disposer d'une grande quantité de culture pour ensemencer. Fréquemment on ne dispose que d'un flacon rempli à moitié seulement (pour maintenir assez d'oxygène). Ou bien on doit même partir d'un seul filament isolé (cf § 5.6: monoclo). Supposons que le point de départ soit 150 g de culture à 1 g/l de concentration en spiruline et que l'objectif soit de multiplier le volume de semence initial pour ensemencer un bassin de 1000 litres. Il va falloir faire au moins 4 cultures successives, en multipliant chaque fois le volume par 5, ce qui demande environ trois semaines au total (avec un taux de croissance de 35 %/jour, facile à obtenir avec du milieu de culture à base de bicarbonate). La première mini-culture se fera dans un bocal de

deux litres, la seconde dans une bassine de 10 litres, la troisième dans une bassine de 50 litres, la dernière dans un mini bassin provisoire en film plastique de 1 m² (ou plusieurs grandes bassines).

Si la concentration initiale de chaque culture est plus faible que Secchi = 5 cm, il faut non seulement ombrer mais agiter jour et nuit (sinon les spirulines peuvent s'agglomérer sur les bords et ne plus pouvoir se disperser ensuite). Il est possible d'éviter cette agglomération en relevant le pH, mais cela augmente les boues minérales qui peuvent piéger les spirulines. On arrive quand même à démarrer une culture en partant de très faibles concentrations (Secchi = 15).

L'agitation continue des cultures en petits récipients (bouteilles, seaux, bassines par exemple) se fait au moyen d'un petit bullage d'air comme dans un aquarium et nécessite un rapport hauteur de liquide/diamètre élevé, égal ou supérieur à 1, avec si possible un fond conique, le tube d'amenée d'air débouchant tout près du fond (il existe des compresseurs d'aquarium fonctionnant sur pile électrique). Il est pratique de chauffer et éclairer simultanément les petites cultures initiales en laboratoire par des lampes à incandescence ou halogène placées à la bonne distance pour maintenir automatiquement environ 35° C dans la culture.

L'agitation de volumes importants (> 100 litres) de cultures diluées peut se faire au moyen d'une petite pompe d'aquarium, mais on a intérêt à ne pomper qu'un quart d'heure par heure pour ne pas abîmer les spirulines, donc à utiliser un programmateur à horloge. Les souches non spiralées sont beaucoup moins sensibles aux dégats des pompes.

Pour éviter la formation de grumeaux (surtout avec les souches spiralées et s'il n'y a pas d'agitation continue) au début de l'ensemencement, il faut diluer très progressivement la semence concentrée, en ajoutant des petites doses de milieu de culture neuf à base d'urée, par exemple à chaque agitation, en gardant une concentration élevée en spirulines les deux premiers jours. On a ensuite intérêt à conserver une concentration en spiruline élevée (0,3 g/l ou plus) et donc à diluer le moins possible la culture à chaque augmentation de volume: une dilution progressive (par exemple quotidienne) est la meilleure. On peut pour cela utiliser un "bassin à géométrie variable", extensible en surface, facile à réaliser avec du film plastique. Chaque augmentation de volume (donc surface) se fait par dilution à l'aide de milieu de culture neuf (de préférence à base de bicarbonate). Le milieu neuf de dilution - s'il est à base d'urée comme source d'azote - doit comporter **une forte dose d'urée (0,05 g/l)** ou, s'il est à base d'urine: 8 ml d'urine/l. Si le milieu neuf est à base de bicarbonate, donc de pH = 8, le pH de la culture se maintient autour de 9,6 pendant sa phase d'extension. Ce pH peut ne pas être suffisant pour éviter les grumeaux de spiralées: dans ce cas relever le pH en ajoutant du milieu à base de carbonate jusqu'à pH = 10,3.

N.B.:

1) Une culture peut mourir suite à une dilution, un éclairage ou un chauffage trop forts, ou un excès d'urée.

2) L'augmentation de niveau d'un bassin doit se faire par ajout de milieu de culture. L'ajout directement dans le bassin des sels non dissouts peut être très dangereux pour la culture.

3) Si on prépare d'avance une réserve de milieu de culture de dilution, la garder fermée et à l'obscurité pour qu'elle ne risque pas de se contaminer par des algues étrangères.

5.4) Taux de croissance initial

La vitesse de croissance dépend du pH. Elle est maximum à pH inférieur à 10, donc on a intérêt à utiliser du bicarbonate pour démarrer rapidement une nouvelle culture. On a aussi intérêt à maximiser la surface de culture (donc bassin peu profond si possible). La méthode d'extension progressive de la surface de bassin ("à géométrie variable") décrite au § précédent favorise une croissance rapide. On caractérise au mieux la rapidité d'implantation d'une nouvelle culture en calculant le taux de croissance exponentielle dans la phase initiale de croissance qui précède la phase des récoltes. Ce taux s'exprime en % par jour. Dans des conditions favorables, en milieu à base de bicarbonate, il peut dépasser 30%/jour. A partir d'un gramme de semence (exprimé en spiruline sèche), un taux de 20%/jour permet d'obtenir 20 m² de bassin de 15 cm de profondeur prête à la récolte en 40 jours, ou 120 m² en 50 jours. D'une manière générale il ne faut pas soumettre les spirulines à plus de 16 heures d'éclairement par jour, même si l'on dispose d'éclairage artificiel.

5.5) Réserve de semence

En temps normal les bassins eux-mêmes servent de réserve s'ils restent en bonne santé et sans contaminant, mais il faut prévoir les accidents et comment passer la mauvaise saison éventuelle. On a aussi intérêt, parfois, à vidanger complètement les bassins et à les redémarrer à zéro pour assurer le maintien d'une bonne qualité de spiruline (sans contaminant, sans droites, filtrant bien). Pour cela il faut disposer de semence pure. Il est donc recommandé de conserver un peu de souche pure "en laboratoire" (= dans la maison), à température modérée ou ambiante, sous faible éclairage environ 12 heures/jour (en l'absence totale de lumière la spiruline meurt en quelques jours, par exemple en 2 jours à 35° C), légèrement agitée, et renouvelée ("repiquée") tous les 2 ou 3 mois : dans ces conditions, elle se conserve bien alors qu'en culture trop intensive elle a tendance à muter et peut dégénérer. Une bouteille en verre ou en plastique convient très bien comme récipient. Pour agiter et aérer, le plus pratique est un petit compresseur d'air électrique pour aquarium, qu'on peut ne faire marcher que de temps en temps grâce à un programmateur (il existe de tels compresseurs et programmateurs fonctionnant sur courant continu). Pour à la fois éclairer et chauffer la culture il suffit d'une lampe de chevet de 40 Watt dirigée horizontalement vers la bouteille, à la distance donnant une température correcte (< 30° C). Pour conserver des quantités plus importantes de semence, on utilise des bassines ou aquariums, avec des lampes plus puissantes, à incandescence ou halogènes; les tubes

luminescents chauffent peu et conviennent si la température ambiante est suffisamment élevée. Photo d'une réserve :



5.6) Sélection et culture monoclonale

L'ensemencement à partir de n'importe quelle semence donne une culture ayant les mêmes contaminants éventuels que la semence. Pour être sûr d'avoir une culture pure ("monoclonale"), il faut théoriquement partir d'un seul filament sélectionné et de milieu stérile.

Il est possible de séparer un filament individuel à partir d'un mélange de souches. Diverses techniques, basées sur une dilution de la culture d'origine, sont utilisables pour effectuer cette séparation, qui reste une opération difficile pour un non-spécialiste. Il est plus facile et rapide de prélever dans une culture très peu contaminée (par des spirulines droites par exemple) une goutte sans contaminant : la sélection se fait par examen au microscope à faible grossissement, en rejetant les gouttes contaminées ne serait-ce que par un seul filament étranger et en mettant les gouttes pures dans du milieu de culture filtré (en rinçant la lame de microscope à la pissette remplie de milieu de culture filtré). On collecte autant de "gouttes" pures que l'on peut dans le temps disponible : plus il y en aura, plus vite on obtiendra une semence utilisable. Il est prudent de faire cette opération de sélection régulièrement pour maintenir ainsi un stock pur de sécurité sans attendre qu'un % de contaminants (droites par exemple) trop élevé rende l'opération de sélection difficile.

6) NOURRITURE MINERALE DE LA SPIRULINE

Bien que la nourriture principale de la spiruline soit le carbone, il ne sera question dans ce chapitre que de la nourriture non carbonée, seulement minérale. Pour la nourriture en carbone voir § 7.8 CULTURE.htm - carbone. Le milieu de culture initial permet une croissance de la spiruline jusqu'à une concentration en spiruline voisine de 2 g/l s'il comporte du nitrate, mais mieux vaut remettre dans le milieu les éléments nutritifs absorbés par la spiruline sans attendre l'épuisement du milieu. Ajouter l'urée (et le cas échéant le CO2 et/ou le sucre comme apport de carbone) quotidiennement en fonction de la récolte désirée ou escomptée dans la journée, les autres nutriments pouvant n'être ajoutés qu'une fois par semaine. Veillez à mettre l'urée (et le cas échéant le sucre) tôt dans la journée, juste après la récolte et en respectant la règle donnée au N.B. c ci-dessous (uréethéo). L'utilisation du nitrate n'impose pas les mêmes précautions que l'urée mais celle-ci est moins chère et plus efficace, elle réduit la formation de grumeaux chez les spiralées et elle renforce la vigueur parfois défaillante des ondulées ; de plus l'urée apporte du CO2 "gratuit". L'ammoniaque peut évidemment être utilisée au lieu d'urée, mais avec encore plus de précautions : là, le goutte-à-goutte est pratiquement nécessaire. Par contre l'ammoniaque a un avantage sur l'urée: elle est immédiatement consommable par la spiruline, alors que l'urée ne s'hydrolyse que petit à petit (une dose trop forte peut constituer une "bombe à retardement").

Tous les ingrédients doivent être dissouts avant d'être introduits dans la culture, sous agitation.

En se basant sur la composition élémentaire de la spiruline donnée en Annexe A19 (A.htm - A19) et les indications du § 4.1 sur le MILIEU de culture, il est facile de calculer les besoins en nourriture minérale selon les produits (engrais) dont on dispose. On tient compte de la pureté chimique des produits, des pertes en cours de production (photoxydation, consommation par les parasites, pertes chimiques) et lors de la récolte. On néglige généralement les apports par l'eau d'appoint. A titre d'exemple pouvant être utilisé assez couramment, voici une formule calculée pour le cas d'une eau non ferrugineuse et de faible dureté, et pour un taux de pertes courant dans les petites exploitations:

Grammes par kg de spiruline produite (comptée en sec) :

Urée = 300 g

Phosphate monoammonique = 50

Sulfate de magnésium = 40

Sulfate dipotassique = 40

Chaux = 10

Fétrilon 13 (ou Ferfol) = 4

Solution d'oligoéléments (selon § A26-2 A.htm - A26) = 50

(S'il y a du nitrate de potassium dans le milieu il suffit de 30 g de sulfate dipotassique)

(La chaux est remplacée par 23 g de nitrate de calcium si ce produit est disponible)

(Le fer peut être introduit sous forme de 50 ml de solution de fer chélaté à 10 g de fer/l, soit 7,7 g de Ferfol/litre) .

N.B.

a) La formule de nourriture ci-dessus n'inclut pas les besoins en nutriments correspondant aux purges de milieu de culture, qui doivent donc éventuellement être ajoutés en plus.

b) La dose de fer peut être ajustée à la demande, certains médecins préférant une teneur modérée en fer dans la spiruline, d'autres 1000 voir 1500 ppm. Pour ces hautes teneurs en fer, l'addition d'un chélatant (EDTA, jus de carambole ou de citron, ou thé vert) ou l'usage de fer chélaté (type Fétrilon) est préférable (CULTURE.htm - fer).

c) La dose d'urée théorique est de 240 g/kg, mais surtout aux bas pH un excès s'avère nécessaire s'il y a tendance à la formation de grumeaux, peaux, etc. Un excès d'urée inutilisé se transforme en nitrate ou se perd à l'atmosphère sous forme d'ammoniac. Supprimer l'injection d'urée dès qu'une odeur d'ammoniac devient perceptible sur la culture ou, si l'on peut doser l'ammonium, suivre la règle donnée en A.htm - A18 (N.B. b). L'urée est la source de CO_2 la moins chère (à part l'air) et si la température du bassin est assez élevée on arrive à en consommer jusqu'à 0,8 kg/kg de spiruline, l'excédent se transformant en nitrate (en consommant de l'alcalinité, selon l'équation : $CO(NH_2)_2 + 4\ O_2 + 2\ NaOH = 2\ NaNO_3 + 3\ H_2O + CO_2$); en fait, de nombreux bilans d'azote nous ont montré que simultanément il y avait "fixation" d'azote atmosphérique avec formation de nitrate supplémentaire, de sorte que l'équation globale pourrait être plutôt : $CO(NH_2)_2 + 2\ N_2 + 6{,}5\ O_2 + 4\ NaOH = 4\ NaNO_3 + 4\ H_2O + CO_2$. Nous n'avons pas encore élucidé si cette "fixation" d'azote se produit aussi en l'absence d'urée, mais des indices indiquent que non. Le nitrate formé peut ensuite servir de source d'azote pour la spiruline par réduction avec restitution de l'alcalinité : $NaNO_3 + 2H_2 = NaHCO_3 + NH_3$.

Voir par ailleurs ci-dessous en N.B. j (phosphate) les effets possibles d'un excès d'urée sur l'équilibre $PO_4/Mg/NH_4$ du milieu de culture.

d) Selon la quantité et l'analyse de l'eau apportée pour compenser l'évaporation, les doses de sulfates, de magnésium, de calcium et de fer peuvent être réduites ou supprimées.

e) L'usage de certains engrais agicoles à dissolution lente (slow release) ou peu solubles, superphosphate, phosphate diammonique (cf alinéa f ci-dessous), sulfate de potassium, n'est pas recommandé car ils contiennent généralement des additifs colorés et odorants et des huiles qui souillent le milieu de culture, formant une pellicule grasse en surface de bassin (freinant l'absorption du gaz carbonique et la désorption de l'oxygène). Par ailleurs les engrais de ce type peuvent contenir des métaux lourds dangereux (notamment cadmium présent dans les phophates naturels) parce que rapidement absorbés par les spirulines. Ces remarques ne s'appliquent pas à : urée, sulfate de magnésium, sulfate de potassium, nitrate de potassium, nitrate du Chili, phosphate mono ou diammonique, chlorure de potassium vendus comme engrais agricoles solubles, même granulés. Le sulfate de fer agricole est de qualité douteuse du point de vue pureté (après dissolution il nécessite au moins une décantation ou une filtration).

f) Pour utiliser le phosphate diammonique granulé comme source de phosphore, si l'on n'en a pas d'autre, F. Ayala procédait comme suit : dans un litre d'acide chlorhydrique 0,5 N (50 ml d'acide concentré à 33 %, dilué dans un litre d'eau) ajouter 250 g de phosphate broyé et porter à l'ébullition ; éliminer la couche huileuse surnageant et récupérer le liquide décanté ; répéter une deuxième fois sur les boues; mélanger les deux liquides décantés, soit environ 1,5 litres contenant à peu près 50 g de phosphore en solution utilisable, correspondant à 5 kg de spiruline.

On pourrait aussi utiliser le superphosphate triple comme source de phosphore, mais à condition d'éliminer la majorité du calcium qu'il contient ; pour cela faire une suspension aqueuse et l'alcaliniser à pH 10 avec du carbonate de soude ou du bicarbonate et de la soude, puis décanter ou filtrer le carbonate de chaux produit.

Vérifier que la spiruline produite à partir de ces sources de phosphore répond à la norme en cadmium.

g) L'apport des oligoéléments par les traces contenues dans l'eau d'appoint et les sels peut ne pas suffire. Si l'eau d'appoint est trop pure (eau de pluie par exemple), on peut utiliser du sel non raffiné (plus éventuellement un peu d'argile et/ou d'eau de cendres) afin d'apporter des oligoéléments, sans oublier de pratiquer les purges correspondantes en cas de salinité exagérée. Mais on peut aussi apporter une partie de l'azote par du nitrate du Chili (riche en oligoéléments) ou bien on peut utiliser des concentrés d'oligoéléments préparés à partir de produits chimiques (cf § 7.7 CULTURE.htm - oligoéléments et annexe A26 A.htm - A26).

h) L'apport de calcium (chaux ou mieux nitrate ou chlorure de calcium) n'est nécessaire qu'au cas où l'eau d'appoint n'en contient pas assez, ou si l'on veut une spiruline enrichie en calcium comme celle de plusieurs producteurs industriels.

i) La consommation de chlorure est théoriquement de 7 g de NaCl/kg de spiruline, mais il est pratiquement inutile d'en ajouter, sauf longévité extraordinaire du milieu de culture. Il est strictement inutile d'en ajouter en cas d'utilisation d'urine ou d'eau de mer.

j) Lorsque le milieu contient simultanément les ions ammonium (NH4), magnésium (Mg) et phosphate (PO4), ce qui est le cas habituel lorsqu'on utilise l'urée et que le pH est inférieur à 10,3, les concentrations de ces ions sont interdépendantes parce que la solubilité du phosphate mixte d'ammonium et de magnésium est extrêmement faible. Pour éviter des déséquilibres, il faut respecter le rapport pondéral sulfate de magnésium/phosphate monoammonique = 2 et maintenir la concentration en ammonium faible. La concentration en ammonium est automatiquement faible si l'urée est apportée par petites fractions et si le pH est élevé (une partie de l'ammonium se transformant en ammoniac NH3 sous l'effet du pH élevé). Pour aider à visualiser cette interdépendance entre les trois ions ci-dessus, un programme de calcul est proposé (phos.exe). Ce modèle est simplement basé sur le produit de solubilité du phosphate mixte, sans tenir compte de l'interaction des autres ions. En l'absence d'ammonium le phosphate de magnésium est aussi très insoluble.

h) Pour une exploitation la plus simple possible, on peut se contenter de nourrir la spiruline seulement une fois par mois mais cela entraine des fluctuations assez fortes dans la composition de la spiruline, notamment en fer. C'est pourquoi il est recommandé de nourrir plutôt hebdomadairement. Si l'urée est utilisée, elle doit être apportée quotidiennement. La base de la nourriture à apporter n'est pas la quantité récoltée mais celle produite par photosynthèse (il y a une différence significative si la concentration en spiruline varie notablement).

Et si l'on n'a pas de produits chimiques ?

Il suffit d'ajouter 17 litres d'urine (c'est une dose moyenne puisque la concentration de l'urine est très variable en fonction du sujet et de l'heure) par kg de spiruline récoltée. L'urine apporte aussi un peu de carbone, ce qui réduit la tendance du pH à monter et permet d'augmenter la productivité de 2 g/m² /jour en l'absence d'alimentation carbonée. Cette solution n'est proposée que pour répondre à des situations de survie, ou pour fournir de la spiruline destinée à l'alimentation animale, ou encore pour ceux qui préfèreraient une spiruline vraiment "biologique". Attention à répartir la dose régulièrement (comme pour l'urée) et à ajouter l'urine juste après la récolte (en tous cas pas le soir) et seulement par beau temps; en régime de croisière, il est recommandé de limiter la productivité à 7 g/j/m² , donc de ne pas ajouter de sucre, et de maintenir une hauteur de liquide assez élevée (minimum 20 cm) et aussi une concentration en spiruline d'au moins 0,4 g/l. Pour une consommation personnelle de la spiruline produite, la stérilisation de l'urine avant usage n'est pas une nécessité (l'auteur ne l'a jamais pratiquée), mais sinon elle parait indispensable au moins pour des raisons psychologiques. La stérilisation peut s'effectuer par dissolution de 5 g de soude par litre une heure avant utilisation.

Une application spéciale de l'utilisation de l'urine pour faire de la spiruline est le recyclage des déchets biologiques des spationautes dans les futures stations spatiales: la spiruline est le meilleur moyen à la fois de retransformer le CO2 en oxygène et les déchets en nourriture. Ce procédé est à l'étude dans de grands laboratoires.

La production de spiruline "biologique" est également possible sans recourir à l'urine, en

n'utilisant que des produits "naturels" (cf § 4.3 MILIEU.htm - bio) comme la trona, le nitrate du Chili, le sulfate de magnésium sous-produit des marais salants et la poudre d'os. Il n'existe pas encore de normes ni d'agrément pour la spiruline "biologique" en France, mais en Californie une spiruline ainsi dénommée est déjà en vente. Récemment le nitrate du Chili s'est vu refuser l'agrément "bio" en Europe, alors que le Ferfol est admis.

N.B.

a) Comme l'urine ne contient pas de fer, son utilisation ne dispense pas d'ajouter du fer.

b) L'urine utilisée doit avoir une odeur et une couleur normales et provenir de donneurs sains et ne prenant pas de médicaments pouvant entraîner une toxicité pour les spirulines, comme les antibiotiques.

c) On dit que le sang d'animal serait un bon aliment pour la spiruline et qu'on peut l'utiliser à dose relativement importante (50 ml/l de milieu de culture). Attention aux contaminations possibles cependant.

d) Il est parfaitement possible de "panacher" produits chimiques et produits naturels.

* * *

7) CONDUITE ET ENTRETIEN DE LA CULTURE

Sommaire :

7.18) Nettoyage des bassins

7.1) Récoltes

On récolte de manière à maintenir la concentration en spirulines au niveau désiré, entre 0,4 et 0,6 g/l, pas forcément tous les jours. Si le milieu est trouble, corriger la mesure de concentration (A.htm - A2), sinon risque de surexploitation et par conséquent de suralimentation et d'intoxication par l'urée si on utilise l'urée. En l'absence de récoltes, avec suffisamment de nutriments, la concentration en spiruline croit jusqu'à l'équilibre entre photosynthèse et respiration, correspondant (avec le taux retenu dans le modèle de simulation en Annexe) à environ 250 g de spiruline/m² de bassin. Il n'est pas bon pour la culture de rester longtemps sans être récoltée, à très haute concentration : cela peut même être une cause de mortalité pour elle. Inversement il n'est pas bon d'abaisser la concentration en dessous de 0,4 g/l, en tous cas de 0,3 g/l : la productivité est plus forte aux basses concentrations mais la culture y est moins stable, et la spiruline y est produite avec une teneur en phycocyanine moins élevée.

7.2) Agitation (cf § 3.4 BASSINS.htm - agit)

On agite au moins 4 fois par jour, mais la fréquence minimum dépend des conditions et de la souche : elle augmente avec l'intensité de la lumière et de la flottation. Au milieu d'une journée très chaude, sans ombrage, l'agitation d'une Souche spiralée flottant fortement doit être très fréquente (au moins deux fois par heure). Si l'on dispose d'un mode d'agitation électrique sans danger pour les spirulines (par exemple bullage d'air, hélice ou roue à aubes), l'agitation peut être continue. Avec les pompes, il vaut mieux ne pas agiter en continu.

7.3) Evolution du pH

Un bon test de croissance d'une culture est son augmentation de pH. En l'absence de supplémentation en carbone et s'il n'y a pas de carences minérales, pour une basicité voisine de 0,1 N et une hauteur de liquide voisine de 20 cm, avec température et ensoleillement élevés, l'augmentation de pH normale doit se situer au voisinage de 0,1 unité/jour pour des pH entre 10 et 10,6. Une autre façon de vérifier que la photosynthèse est active est d'observer le dégagement d'oxygène à la surface du bassin en l'absence d'agitation.

7.4) Ombrage

En l'absence de supplémentation en carbone le pH peut monter à 11,5 et plus, mais la spiruline ne peut supporter longtemps un pH supérieur à 11,3. Un demi-ombrage suffit généralement à maintenir le pH en dessous de 11. Si l'agitation est bonne, on peut empêcher la montée excessive du pH sans mettre d'ombrage en maintenant un stock de spiruline élevé (> 150 g/m²), c'est-à-dire une concentration en spiruline supérieure à environ 0,7 g/l pour une hauteur de liquide de 20 cm, ce qu'on peut appeler faire un "auto-ombrage".

L'ombrage est par ailleurs nécessaire quand la température de la culture est trop basse (< 10° C) par grand soleil, sinon la culture peut facilement mourir par photolyse.

Il faut ombrer aussi pour économiser l'eau en saison sèche, ou si la température a tendance à dépasser 38° C dans la culture.

Une culture sous ombrage est plus facile à récolter et la qualité de la spiruline est améliorée (plus riche en pigments)..

7.5) Niveau d'eau

Veiller à ajouter de l'eau dans le bassin (de préférence le soir) pour maintenir le niveau voulu. Ne pas ajouter plus de 10 % du volume par jour. Si l'eau d'appoint est très calcaire il se produit des boues minérales dans le bassin et à la longue il est préférable de les éliminer. L'eau d'appoint contient aussi des sels solubles qui augmentent peu à peu la salinité ; de même l'utilisation de nitrate comme source d'azote ou de bicarbonate comme source de carbone augmente la salinité ; ceci peut obliger à pratiquer des purges pour empêcher la salinité de dépasser 30 g/l. Par contre l'eau d'appoint (sauf l'eau de pluie) apporte des oligoéléments bénéfiques.

Dans les bassins ouverts, la pluie est bénéfique tant qu'elle reste modérée (par exemple 10 % du volume du bassin par jour), mais une dilution brusque trop forte du milieu de culture fait tomber les spirulines au fond. En fin de saison des pluies on a intérêt à garder le niveau maximum permis par le bassin (ce qui permettra d'économiser de l'eau en saison sèche). Si la source d'alcalinité n'est pas rare, et/ou si la pluviométrie n'est pas excessive, on peut admettre dans le bassin toute la pluie qui tombe, en veillant à pratiquer à temps des purges de milieu de culture pour empêcher le bassin de déborder ; ces purges se font en récoltant sans recycler le filtrat ou en aspirant le fond pour éliminer des boues, puis en remettant dans le bassin les sels correspondant au volume de milieu de culture éliminé. Ces purges maintiennent la qualité du milieu de culture et lui apportent des oligoéléments contenus à titre d'impuretés dans les sels d'appoint. Si on ne dispose pas de concentré d'Oligoéléments, on peut être amené à pratiquer des purges dans le seul but d'introduire des oligoéléments.

Un niveau d'eau élevé (30 cm ou même plus) evite les surchauffes en climat très chaud et il est probablement utile pour faciliter l'autoépuration du milieu de culture (cf MILIEU.htm - épuration). Un niveau bas est intéressant pour réduire la dépense en milieu de culture, mais nécessite un fond bien plat (avec un point plus creux pour faciliter la récolte du flottant), des purges suffisantes pour maintenir la qualité du milieu et une surveillance accrue du pH, de la température et de la concentration en nutriments pour ne pas dépasser les limites autorisées.

En bassin ouvert, si des purges ne sont pas nécessaires pour maintenir la qualité du milieu et si les bords sont suffisamment hauts, le niveau et la basicité varient en cours d'année : s'arranger pour que le niveau minimum soit suffisant et pour que la basicité reste suffisante (> 0,05) lors du niveau maximum.

7.6) Fer

La spiruline est un aliment des plus riches en fer. Il faut donc lui en fournir beaucoup, et sous une forme assimilable ce qui n'est pas évident à cause du pH élevé du milieu de culture. Si la spiruline n'est pas assez vert foncé, cela peut être du à un manque d'azote, mais aussi à un manque de fer.

Même une spiruline bien verte peut se révéler faible en fer à l'analyse (par exemple 200 ppm). Parfois il y a assez de fer dans les sels et/ou l'eau utilisés.

Le moyen classique d'introduire du fer est de préparer une solution de fer à 10 g/l de la manière suivante : dans 1 litre d'eau mettre avec 50 g de sulfate de fer heptahydraté + 20 ml d'acide chlorhydrique concentré ; compléter à 2 litres d'eau. [N.B. La pureté des sulfates de fer vendus pour traiter les gazons est souvent inadéquate: il faut alors filtrer ou décanter la solution ou recourir à du sulfate pur, à moins de recourir à des produits prêts à l'emploi à base de fer chélaté, comme le Ferfol]. L'emploi de 200 ml de solution à 10 g/l par kg de spiruline produite correspond à 1000 ppm de fer.

On peut faire tremper 50 g de clous rouillés dans un litre de vinaigre additionné du jus de 4 citrons ou caramboles ; conserver en récipient non hermétique (dégagement d'hydrogène), en agitant de temps en temps : on obtient au bout de deux semaines un "sirop de clous" à environ 10 g/l de fer, qui peut être utilisé comme source de fer "biologique".

Il est toujours préférable d'introduire la solution de fer à faible débit dans le milieu de culture (au goutte-à-goutte si possible) et sous agitation. Voici une procédure convenable : faire une pré-dilution de la solution de fer (200 ml dans 10 litres d'eau), bien agiter et ajouter lentement (si possible au goutte-àgoutte) dans la culture en l'agitant très bien, ce qui est essentiel.

Un chélatant comme l'EDTA rend le fer plus assimilable par la spiruline, mais rend également le fer de la spiruline plus assimilable par l'organisme humain (BIBLIOGRAPHIE.htm - Manoharan). L'emploi d'environ 50 mg de sel disodique de l'EDTA par litre de milieu de culture initial permet de porter facilement la teneur en fer de la spiruline à 1000, voire 1500 ppm (ce qui est d'ailleurs jugé excessif par certains médecins); on peut ensuite rajouter un peu de chélatant de temps en temps. Les jus de citron (acide citrique) et surtout de carambole ont un pouvoir chélatant pour le fer, de même que certains extraits aqueux de terre végétale ou d'argile stérilisés par tyndallisation (portés 10 minutes à 80° C deux fois à 24 heures d'intervalle).

On peut aussi utiliser comme apport de fer des produits commerciaux contenant du fer chélaté, comme le Fetrilon 13 ou le Ferfol à 13 % de fer chélaté à l'EDTA. Le Séquestrène 100 SG à 6 % de fer chélaté à l'EDDHA, réputé plus efficace que l'EDTA à pH élevé, a l'inconvénient de fortement colorer en rouge le milieu de culture et n'est pas recommandé.

Le sang (A.htm - sang) serait aussi une source de fer "biologique" très assimilable (à 9 g/l), mais nous ne l'avons pas essayé.

La dose de fer à apporter est un sujet de discussion. Une dose moyenne de 500 ppm paraît convenable. Il a été rapporté la possibilité d'obtenir des spiruline extrêment riches en fer (jusqu'à 5000 ppm)..

Plus on ajoute le fer régulièrement plus la teneur en fer de la spiruline sera régulière. Si on n'ajoute le fer (chélaté) qu'une fois par mois, par exemple, la teneur en fer de la spiruline juste après l'ajout sera très forte (par exemple 1000 ppm), alors qu'elle sera faible juste avant l'ajout (par exemple 300 ppm).

Un article récent de Puyfoulhoux B. *et al.* (2001) BIBLIOGRAPHIE.htm - Puyfoulhoux tend à prouver

que la biodisponibilité du fer de la spiruline est équivalente à celle de la viande.

7.7) Oligoéléments

Au lieu de compter sur l'eau d'appoint et les sels pour apporter les oligoéléments nécessaires à la croissance de la spiruline, il peut être plus sûr et même plus économique de les apporter par une solution concentrée toute prête (de coût très faible). L'apport au moins des oligoéléments majeurs (bore, cuivre, manganèse et zinc) parait recommandé en cas de faible taux de renouvellement du milieu sur une longue période. Le risque de dépasser la dose maximale permise pour un oligo-élément qui serait déjà présent en quantité notable dans l'eau ou les sels utilisés est faible si la solution d'oligoéléments est ajoutée au prorata des récoltes, à concurrence par exemple du quart ou de la moitié des besoins théoriques. Il serait plus sûr de n'ajouter que ce qui manque dans le milieu de culture, mais cela oblige à utiliser des moyens analytiques hors de portée de l'artisan. Il existe différentes formules d'oligoéléments : A.htm - formules. La plus citée est celle du milieu Zarrouk BIBLIOGRAPHIE - Zarrouk (cf Annexe A18 A.htm - Limites) mais elle parait inutilement compliquée, tout en étant incomplète. L'apport de sélénium se fait généralement par le sélénite de sodium, de manipulation délicate car très toxique, que nous préférons éviter.

L'ajout d'oligoéléments semble un facteur positif pour assurer une bonne récoltabilité de manière habituelle.

Faut-il ajouter du cobalt ? C'est un sujet de discussion lié au fait que la vitamine B12 (la cyanocobalamine, qui contient du cobalt) est abondante dans la spiruline, alors que certains réglements limitent l'ingestion de cette vitamine ; par ailleurs la vitamine B12 de la spiruline serait riche en "analogues de B12" dont il faudrait se méfier. Des éclaircissements scienifiques sur ce sujet sont souhaitables.

Il y a un meilleur consensus sur l'intérêt d'une dose majorée de zinc (incluse dans la formule "J.P. Jourdan"). Un autre moyen d'introduire du zinc, proposé par J. Falquet, est d'ajouter 20 g de sulfate de zinc heptahydraté aux 50 g de sulfate de fer dans la préparation de solution de fer rapportée au § prédédent classique. Une dose de 500 ppm de zinc serait convenable.

Il y a un peu de nickel dans la spiruline, mais on ignore si ce métal doit être considéré comme un oligoélément bénéfique ou s'il est simplement absorbé: il n'a pas été inclus dans la formule "J.P. Jourdan" en raison de risques possibles de toxicité sur l'homme.

7.8) Comment augmenter la productivité par apport de carbone

L'aliment principal de la spiruline est le carbone dont la source normale est le gaz carbonique. La méthode de culture la plus simple, où la nourriture carbonée vient de **l'air** (qui contient du gaz carbonique, mais extrêmement dilué), présente une productivité modeste, mais qui, exprimée en protéines, reste très supérieure à celle des meilleures cultures agricoles ou horticoles, et qui, exprimée en calories alimentaires, leur est équivalente, et ceci sans consommer plus d'eau, ou même nettement moins. L'absorption du CO_2 atmosphérique se fait nuit et jour, indépendamment des variations quotidiennes du temps, lequel n'influe donc pas sur la productivité moyenne de ces cultures ; cette dernière n'est pas non plus affectée par une température exagérée la nuit (le pH

baisse à cause de la respiration nocturne, mais sans perte de CO_2, qui sera utilisé plus tard). Dans ces cultures on maintient le pH vers10,6 ou moins en jouant sur l'ombrage.

Si l'atmosphère du bassin communique avec une **source de CO_2** dans l'air, comme un compost en fermentation, une étable, une combustion de gaz propre ou encore une source d'eau gazeuse, le pH du bassin par beau temps sera plus bas et la productivité augmentera sensiblement. Le cas des gaz de combustion est traité quantitativement dans le programme de simulation en Annexe.

Mais il est aussi possible d'augmenter la productivité par beau temps, de la faire passer par exemple à 12 ou 15, voire 20 g/jour/m² , en injectant du **gaz carbonique pur** directement dans la culture pour baisser son pH à 10 ou moins. La consommation de CO_2 est de l'ordre de 2 kg/kg de spiruline (théorie = 1,71). Le gaz est amené sous un morceau de film plastique tendu sur un cadre flottant sur le bassin, formant comme une "cloche" ou une "tente" quand le gaz s'y accumule. La surface du cadre flottant doit être de 3 % de la surface du bassin. On règle le débit de gaz pour ne pas en perdre trop par les bords du cadre. Eviter l'entrée de bulles d'air et purger une fois par jour l'oxygène qui s'accumule sous le plastique. On a intérêt à faire buller le gaz au fond du bassin à travers un diffuseur donnant des bulles très fines, ou même au bas d'un puits pratiqué au fond du bassin (si la hauteur de barbotage est supérieure à 30 cm on peut se passer de la cloche flottante en film plastique). A noter qu'on obtient un meilleur rendement d'absorption du CO_2 la nuit en raison de l'absence de dégagement d'oxygène dans le milieu de culture. Une autre façon d'injecter le gaz est de l'introduire dans un venturi à la sortie d'une pompe et de faire parcourir à l'émulsion un ou deux mètres de tuyau.

Si l'on ne dispose pas de gaz carbonique en cylindres mais d'une **fermentation** alcoolique à proximité du bassin de spiruline, il est assez facile de capter le gaz carbonique pur produit par la fermentation, mais sa pression sera trop faible pour passer à travers un diffuseur et la surface du cadre flottant devra être majorée de moitié, à moins d'utiliser un compresseur d'aquarium ou une pompe d'aquarium munie d'un dispositif aspirant émulsionneur de gaz.

Au lieu de gaz carbonique on peut utiliser du **bicarbonate**, mais alors il faudra pratiquer des purges pour maintenir la salinité à un niveau acceptable (densité voisine de 1015 g/l) et rajouter les éléments du milieu de culture (autres que le bicarbonate) correspondant au volume purgé. Il faut environ 2 à 6 kg de bicarbonate par kg de spiruline, selon la productivité souhaitée. Cette méthode est très pratique ; elle évite notamment d'avoir à surveiller le pH. Les purges prévues au § 7.5 (niveau) comptent dans le total des purges à effectuer. On peut simplifier la procédure de purge en incluant dans la nourriture des spirulines les sels perdus dans la purge : il suffit alors de remplacer le volume purgé par le même volume d'eau ; la formule de nourriture fournie par les programmes de calcul en Annexes A27 et A30 est établie sur cette base. La pratique des purges demande des précautions vis-à-vis de l'environnement (voir § 4.5 dans MILIEU.htm - Epuration).

La proximité d'un **lac naturel sodique** offre une très intéressante possibilité : celle d'y envoyer les purges et d'y puiser de quoi les remplacer. En général les lacs sodiques sont à un pH voisin de l'équilibre avec l'air, c'est-à-dire proche de 10. Le pompage d'eau du lac dans la culture à pH 10,5 lui apporte donc du CO_2. L'eau du lac doit être filtrée (par exemple sur filtre à sable) avant d'être admise dans la culture, pour ne pas risquer de la contaminer. Si sa composition n'est pas correcte pour la spiruline, il convient de la corriger par les apports nécessaires (en général ce sera de l'urée et du fer) et de la diluer si sa salinité est trop élevée. Les purges recyclées au lac y sont épurées biologiquement par un processus naturel. Le fait de disposer de CO_2 pratiquement gratuit permet de faire des apports de carbone importants et de pousser la productivité par beau temps facilement

à 12 g/jour /m² (moyennant un pompage de l'ordre de 3000 litres par kg de production, pour une salinité de l'ordre de 13 g/l).

Le **sucre** constitue une autre possibilité d'introduction de nourriture carbonée (BIBLIOGRAPHIE.htm - Jourdan1996). Sa consommation théorique, en l'absence d'autres sources de carbone, est de 1,11 kg/kg. Le poids de sucre qu'un bassin est capable d'oxyder dans la journée est du même ordre que sa production de spiruline : c'est la dose à ne pas dépasser de toutes façons. Ajouter le sucre le matin, les jours de beau temps seulement, afin de ne pas provoquer d'odeurs de fermentation, un mauvais rendement de transformation du sucre en CO2 et une production de boues flottantes excessives (cf § 7.15 : boues), surtout si le milieu contient d'autres matières organiques. Pour que le sucre puisse fermenter en produisant du CO2, il est souvent nécessaire que le pH soit inférieur à 10,8 (mais j'ai vu au moins une fois le sucre baisser rapidement le pH d'une culture qui avait atteint 11,1). Si les ferments ont été stérilisés par un pH trop élevé, réensemencer la culture avec un "levain" prélevé sur un autre bassin. Commencer à "sucrer" dès que le pH atteint 10,4 ; il faut deux jours pour en voir l'effet ; régler ensuite l'apport de sucre pour maintenir le pH autour de 10,4; une dose moyenne de 0,6 kg/kg de spiruline suffit en général, par beau temps. En fait il est recommandé de ne pas dépasser la dose de 6 g de sucre/m² /jour de beau temps (et même de préférence 3) si l'on veut éviter des effets secondaires indésirables comme une turbidité excessive du milieu de culture et des difficultés de récolte pouvant aller jusqu'à l'impossibilité d'essorer la biomasse par pressage, surtout en début de période de sucrage. Ces difficultés peuvent provenir d'un manque d'azote (provoquant une surproduction d'exopolysaccharides) du à la consommation d'azote des ferments ; en début de sucrage, il est donc bon de majorer l'urée.

Le sucre peut être remplacé par de la canne à sucre écrasée, à raison de 7 kg/kg de sucre (laisser tremper la canne une journée ou plus dans le bassin puis la retirer) ou par du jus de canne. Eviter d'utiliser la mélasse, trop impure ; par contre le miel ou le glucose pur seraient excellents s'ils étaient moins chers. Le sucre peut aussi être apporté par divers produits en contenant comme le petit lait (ne pas dépasser la dose de 4 litres par kg de spiruline). Il peut aussi être remplacé par des feuilles de plantes fraîches trempant dans le milieu de culture (en quelques jours il ne reste que les nervures de cellulose). A noter que le sucre à forte dose provoque une augmentation de la turbidité du milieu, dont il faut tenir compte lors de la mesure de la concentration par le disque de Secchi (A.htm - Secchi). Une culture au sucre est moins "propre" : plus de boues et filtration moins rapide. Mais les boues elles-mêmes sont petit à petit oxydées, contribuant ainsi à apporter du CO2. La teneur en protéines de la spiruline obtenue avec le sucre est rigoureusement identique à celle d'une production au CO2.

Le remplacement du sucre par le glucose permet théoriquement de réduire les inconvénients du sucre. Le glucose est directement assimilable par la spiruline ou bien il peut être directement oxydé par l'oxygène de photosynthèse : les ferments deviendraient inutiles, d'où une culture plus "propre" et filtrant mieux, et possibilité de travailler à pH > 10,8 si on le désire. La seule fois où nous avons voulu utiliser du glucose commercial, il s'agissait d'un produit "bio", trouble et de couleur brune, qui nous a semblé polluer le bassin, comme lorsque nous avons essayé la mélasse. Nous avons interrompu l'essai. Par contre nous avons utilisé sans problème du glucose obtenu par hydrolyse d'une solution de sucre acidulée.

Enfin il faut mentionner l'apport non négligeable en CO2 de **l'urée**, qui est même la source de CO2 la moins chère. Voir au § 6, N.B. c (NOURRITURE.htm - uréethéo) les précautions d'emploi indispensables.

Rappelons qu'en cas de nourriture de la spiruline par **l'urine**, celle-ci apporte du carbone supplémentaire équivalent à 2 g de spiruline/jour/m² .

Enfin mentionnons qu'il est parfaitement possible de panacher les différentes sources de carbone.

D'une manière générale il est recommandé de ne pas chercher à maintenir des productivités records, parce qu'elles augmentent la fréquence des mutations et la vitesse de salissure du milieu de culture ; à productivité modérée le milieu peut s'autopurifier. De toutes façons, les aléas du temps font que la productivité moyenne ne dépasse généralement pas 7 g/jour/m² sur une saison de production.

7.9) Exopolysaccharide (EPS)

La spiruline sécrète un exopolysaccharide sulfaté (une espèce d'alginate), qui forme comme une capsule à la surface externe des spirulines puis est relâché dans le milieu de culture où il finit par former des peaux ou des grumeaux jaune-bruns de taille variable, microscopiques (visibles au microscope après coloration du milieu à l'encre de Chine, l'EPS ne se colorant pas) ou visibles à l'oeil nu. Les grumeaux ou peaux d'EPS sont plus denses que le milieu de culture et peuvent se déposer au fond du bassin, puis s'en détacher en se chargeant de bulles de gaz de fermentation et flotter ; le tamis de récolte arrête ceux qui sont suffisamment gros. La production normale d'EPS à bas pH et sous forte lumière est de l'ordre de 30 % de celle de la spiruline, mais il semble se former encore de l'EPS à des pH très élevés ; s'il y a carence d'azote, la photosynthèse produit exclusivement de l'EPS (Cornet J.F., 1992). Même en présence de nitrates, la carence en ammonium parait favoriser la formation d'EPS si les conditions de luminosité et de température sont insuffisantes pour la réduction des nitrates. En présence d'ammonium la protéinogénèse est ralentie par une température insuffisante, mais moins qu'avec nitrates seuls. La carence en fer semble aussi gêner la protéinogénèse et donc favoriser l'EPS.

L'EPS est biodégradable plus ou moins rapidement selon les circonstances, ce qui limite la quantité qui se retrouve dans la spiruline récoltée. Une spiruline à 60% de protéines contiendrait 30% d'EPS (Rapport Melissa 1996, page 90). Des recherches en cours semblent montrer que les polysaccharides (endo et/ou exo) de la spiruline ont des propriétés thérapeutiques intéressantes.

La présence d'une certaine quantité d'EPS parait faciliter la récolte. Avec une souche spiralée, l'excès d'EPS entraîne parfois la floculation de spirulines avec formation de peaux ou grumeaux verts flottants. Ces derniers, lors de la récolte sont facilement retenus par le tamis sur lequel ils se rassemblent en agglomérats faisant immédiatement "la boule": s'il n'y a pas simultanément de boues flottantes, on peut les joindre à la biomasse récoltée en les tamisant à l'aide de l'extrudeuse en remplaçant sa filière par un tamis ; la qualité de la spiruline ainsi récoltée est un peu moins bonne que la normale (une analyse faite en juin 1999 sur le produit séché a donné 52 % de protéines et un peu trop de microorganismes aérobies). On pourrait craindre que la formation de grumeaux augmente le % de droites : l'expérience, lors d'une énorme production de grumeaux (octobre 1999) nous a montré que non. L'augmentation du pH et de la température, l'ajout de fer (s'il y a carence) et surtout l'ajout d'urée combattent efficacement ces peaux et grumeaux ; suivre la règle : "forcer l'urée s'il y a des grumeaux verts ou des peaux flottantes, baisser l'urée s'il y a odeur d'ammoniac". Une brusque dilution et/ou une brusque diminution du pH peuvent aussi provoquer la floculation des spirulines spiralées en grumeaux verts flottants.

Un excès d'EPS semble conduire à une impossibilité d'essorer la biomasse par pressage, alors

qu'un défaut d'EPS semble conduire à une biomasse très collante mais facilement essorable.

7.10) Anomalies

On constate parfois que la vitesse de croissance de la spiruline d'un bassin varie cycliquement, avec une période de l'ordre de 15 jours: il ne faut pas s'en étonner, mais il est bon de le savoir. Les différents bassins sur un même site ne sont pas forcément en phase donc ce cycle ne dépend pas de la lune).

Si une culture vire au brun kaki sans que la photosynthèse s'arrête, il y a certainement un manque d'azote. L'excès de lumière, surtout à froid ou en l'absence d'agitation, ou encore à trop faible concentration en spiruline, ou l'excès de pH prolongé (pH>11,3) produisent une décoloration, puis la destruction progressive de la spiruline. Si trop de spirulines ont été cassées, ou détruites, le milieu de culture devient sale (trouble, moussant jaune, ou un peu visqueux, ou "blanc" comme du lait dilué, ou au contraire brun, ou malodorant), fermente (dégagement de bulles même la nuit) et/ou la filtration et/ou le pressage lors des récoltes deviennent difficiles, voire impossibles. En général la culture peut guérir d'elle-même en une ou deux semaines, de préférence au "repos" dans des conditions de lumière et de température douces, à condition qu'elle ne soit pas carencée (en azote et en fer notamment). La pratique des purges du milieu peut aider à la récupération de la culture ; un réensemencement est particulièrement efficace. Si le redémarrage ne se fait pas, le milieu est probablement devenu toxique pour les spirulines : vidanger. Une vidange totale de temps en temps est un moyen puissant, mais coûteux, pour éviter des anomalies de culture.

Si la culture contient beaucoup de spirulines cassées en petits fragments, cela peut être du à un excès de lumière (surtout matinale) ou à une agitation trop brutale, ou encore à un manque de potassium. Des spirulines anormalement longues peuvent être signe d'un manque de fer, à moins qu'il s'agisse d'une culture en croissance très faible.

Les spirulines de certaines souches (Spiralées par exemple) flottent habituellement à la surface du milieu de culture, tandis que d'autres (ondulées, droites) restent plus volontiers dans la masse de la culture. Si les spirulines tombent au fond du bassin, c'est souvent le signe qu'elles sont sous-alimentées en azote ou en fer; un changement brusque de pH ou de salinité peut aussi faire tomber les spirulines au fond, par exemple une grande pluie qui double le volume d'eau. Une température très basse a le même effet. Les spirulines au fond du bassin sont en grand danger de mourir et de se transformer en boues organiques brunes: pour augmenter leurs chances de survie il faut les remettre en suspension le plus fréquemment possible. De même la partie supérieure de la couche flottante est en danger de mort par photolyse (brunissement ou blanchiment) en cas d'ensoleillement trop fort et trop prolongé sans agitation suffisante.

Les spirulines spiralées ont assez souvent tendance à s'agglomérer en grumeaux verts lorsque la production d'EPS est abondante ; ces grumeaux flottent s'ils sont très riches en spirulines, contrairement aux boues brunes d'EPS. Mais si la proportion de spirulines dans les grumeaux est faible par rapport à l'EPS (grumeaux de couleur tirant vers le brun), ils ne flottent plus et peuvent rester entre deux eaux et gêner la récolte en colmatant rapidement le tamis.

Des boues brunes remontent à la surface, et flottent passagèrement en période de photosynthèse active, surtout quand on agite le fond, mais normalement elles retombent au fond avant le lendemain matin. On peut les éliminer par tamisage (épuisette ou filet). La flottation nocturne de ces boues est due à la fermentation anaérobie d'une couche de boues trop épaisse et manquant

d'oxygène (hypoxie, anoxie), situation qui demande plusieurs jours pour se guérir (agiter plus fréquemment les boues, et/ou en enlever la majorité). Le remède recommandé est de transférer le bassin dans un autre et de le nettoyer. Les boues sont un mélange de minéraux insolubles (carbonates et/ou phosphates), de produits de décomposition de spirulines mortes (contenant de la chlorophylle A et surtout des caroténoïdes qui donnent aux boues une couleur brune caractéristique), d'EPS et de microorganismes biodégradeurs. La couleur des boues tire parfois sur le rose, mais elle est en général jaune brune.

On trouve fréquemment dans les boues des cristaux en aiguille, souvent rassemblés en faisceaux: il s'agit de phosphate mixte d'ammonium et de magnésium, soluble en milieu acide; il arrive que ces cristaux soient entraînés dans la couche flottante de spiruline et récoltés avec elle, mais ils ne présentent pas de danger. Pour empêcher la formation de ces cristaux, il faut éviter des doses trop fortes de phosphate, magnésium et/ou ammonium.

Une mauvaise odeur correspond généralement à un mauvais état ou à une récolte insuffisante, ou à une fermentation anaérobie ou encore à une addition excessive d'urée, de sucre ou d'urine. Une odeur modérée d'ammoniac, correspondant à 20-30 ppm d'ammoniac dans le milieu, n'est pas grave mais alerte sur un danger imminent possible. L'usage de sucre comme apport de carbone provoque parfois des odeurs de ferments ou de levures pas réellement désagréables. Une culture de spiruline en bonne santé et à température idéale dégage souvent une odeur aromatique caractéristique et agréable, tirant sur le géranium ou la rose.

7.11) Contamination par petits animaux

Sauf protection complète du bassin, il est inévitable que des insectes ou parfois de petits animaux (serpents, lézards, grenouilles, souris, escargots), des feuilles et autres débris végétaux tombent dans le bassin. On peut les enlever avec un filet, mais si on les laisse, ce qui n'est pas recommandé, ils finiront par être "digérés" par le milieu de culture et servir de nourriture à la spiruline. Par contre certains vers et insectes sont capables de vivre dans le milieu de culture en parasites. C'est le cas de la mouche Ephydra (petite mouche brune qui marche sur l'eau) et de ses larves: en cas d'infestation il n'y a pas grand'chose à faire contre elle sinon de récolter au maximum les larves et nymphes, ou de placer le bassin sous serre ou moustiquaire. Parfois des larves de moustique, du zooplancton (rotifères, spécialement brachyonus, cyanophages, amibes capables de manger les spirulines), s'installent et vivent un certain temps dans le bassin: pour hâter leur disparition on peut laisser monter momentanément le pH, ou même carrément ajouter de la soude jusqu'à pH 12 puis maintenir ce pH pendant une nuit, en ré acidifiant le matin à pH 10 ; mais ce choc de pH tue aussi une partie des spirulines qui doivent ensuite être mises en convalescence (ombrées). Parfois il suffit d'une brusque augmentation de la salinité de 3 g/l pour faire disparaître les envahisseurs. On peut aussi monter la température à 44° C pendant 2 à 4 heures. L'addition de 40 ppm d'ammoniac peut faire disparaître les amibes (du moins leur forme végétative, mais pas les kystes, donc effet transitoire), mais celles-ci peuvent aussi disparaître en quelques jours de beau temps donnant une température de 36-38° C avec croissance rapide de la spiruline ; le maintien d'une concentration en spiruline pas trop élevée et d'une bonne agitation favorise la disparition des amibes. De même les rotifères ne peuvent pas envahir une culture en bonne santé. En cas d'infestation par des larves, des cyanophages ou des rotifères, la récolte reste possible car ils sont arrêtés par le tamis (ajuster au besoin la maille du tamis: pour les brachyonus il faut une maille de 120 µ). L'infestation par des larves dépend du lieu, du climat. Elle peut n'être que transitoire. Certaines années, elle ne se produit pas. Sous serre, le risque d'infestation est réduit ou annulé. Nous n'avons jamais eu de rotifères à Mialet, mais nos collègues indiens en ont eu assez

souvent. A noter que les rotifères ne sont pas toxiques et ne mangent pas la spiruline spiralée en bonne santé, mais par contre se développent rapidement en cas de mauvaise santé de la spiruline et finissent par envahir la culture en lui donnant une coloration rougeâtre. Les rotifères sont très souvent présents dans les cultures à ciel ouvert, en petit nombre, et contribuent à éliminer les chlorelles.

Ripley Fox explique que les amibes éventuellement présentes dans une culture ont une probabilité quasi nulle d'être toxiques. Par précaution, cependant, il est recommandé de ne pas consommer fraîche la biomasse provenant d'une culture contenant des amibes. Lors du séchage à 65° C elles sont tuées de toutes façons.

N.B.: 1) les moustiques mâles issus des bassins de spirulines seraient stérilisés par le haut pH de la culture (selon une étude indienne) et les bassins constitueraient alors un moyen de lutte biologique contre les moustiques.

2) le zooplancton que nous avons vu cohabiter avec la spiruline n'était pas toxiques pour l'homme.

7.12) Contaminations par algues étrangères

Des "spirulines droites" (non spiralées) apparaissent fréquemment dans les cultures, phénomène apparemment favorisé par une température trop élevée (> 38° C). Elles ressemblent aux cyanobactéries Oscillatoria, dont il existe des variétés toxiques (cf alinéa suivant), mais nous avons vérifié que les "droites" que nous avons eues jusqu'ici sont bien des spirulines (arthrospira platensis), d'ailleurs de composition normale, non seulement en utilisant des critères dimensionnels et morphologiques, nuance de couleur, etc., et en vérifiant leur teneur en acide gamma-linolénique (très nettement supérieure à celle des Oscillatoria), mais en faisant faire une étude des "empreintes génétiques" par l'Université de Genève. Les spirulines droites flottant généralement beaucoup moins, ou moins vite, que les spiralées, on peut contrer leur prolifération en ne récoltant pas la couche flottante mais en récoltant la culture homogène et en gérant la culture pour réduire le taux de croissance des droites. Une bonne agitation évite la photolyse des spiralées, les plus flottantes donc les plus exposées au soleil, donc elle permet d'éviter la prolifération des droites. Lorsqu'il y a peu de droites, la couche flottante peut les contenir toutes et on peut donc la récolter ; mais au-delà d'un certain % de droites, ce n'est plus le cas. En cas d'infestation avancée d'une culture de Spiralées, on peut essayer d'agir comme décrit plus bas dans ce paragraphe à propos de l'algue chlorelle (réduction de l'agitation, réensemencement massif en Spiralées flottantes: infest). Un petit programme de simulation mathématique en Qbasic (dénommé drimpr.exe) permet de bien appréhender l'influence de divers facteurs sur l'apparition (en général brusque) des droites dans une culture jusque là majoritairement spiralée. Les spiralées ayant une tendance marquée à s'agglomérer en grumeaux dans certaines conditions (bas pH, basse température, absence d'ammonium), on pouvait craindre que la formation de grumeaux augmente le % de droites : l'expérience nous a montré, lors d'une énorme production de grumeaux en octobre 1999, que ce n'était pas le cas.

Tant que la spiruline est en croissance active, tant qu'elle est bien nourrie, récoltée, agitée et à pH > 9,5, d'un beau vert foncé et que le milieu est régulièrement purgé, aucune espèce d'algue concurrente ne réussit habituellement à envahir le bassin, du moins nous n'en avons jamais vu. L'apparition d'algues étrangères peut toutefois se produire, par exemple l'hiver en zône tempérée,

et ne pas se voir. C'est pourquoi il est prudent de faire examiner (une ou deux fois par an par exemple) un échantillon de culture dans un laboratoire équipé d'un bon microscope et entraîné à reconnaître ce qui n'est pas de la spiruline: il peut s'agir de simples chlorelles (algues vertes monocellulaires comestibles) ou d'Oocystis (grosses chlorelles), mais aussi de cyanobactéries toxiques comme Oscillatoria agardhii (ressemble à une spiruline droite mais de longueur de cellules double, Oscillatoria rubescens ou Oscillatoria nigri-viridis (ressemblent à des spirulines droites mais de diamètre et longueur de cellules nettement plus grands et de couleur différente), Anabaena flos-aquae (ressemble à une spiruline droite mais avec des indentations au niveau des parois entre cellules), Anabaenopsis arnoldii (ressemble à une spiruline spiralée mais avec des hétérocystes, renflements lui permettant de fixer l'azote) ou Microcystis aeruginosa (cf Annexe A22 A.htm - A22 pour comparer les spirulines à ces algues). Oscillatoria grunowiana articulata tenius, non toxique et trop petit pour rester dans la biomasse pressée se voit au microscope après avoir teinté l'échantillon à l'encre de Chine. Si l'algue contaminante est eucaryotique (cellules à noyau bien distinct), il s'agit d'une algue verte ou brune, lesquelles ne sont très généralement pas toxiques. Un oeil exercé distingue facilement les principales Oscillatoria toxiques des spirulines droites.

Un test biologique de toxicité, simple, a été proposé par R. Fox: si des larves d'artémias ne meurent après plus de 6 heures au contact d'une culture de cyanobactérie, celle-ci ne serait pas toxique. Pour avoir des larves d'artémias il suffit de tremper deux jours leurs oeufs (qui se vendent dans les magasins d'aquariophilie et se conservent au réfrigérateur) dans l'eau salée à 30 g/l à température ordinaire et sous faible lumière. On met de l'ordre de 10 % de culture de spiruline à tester dans la culture de larves d'artémias, dans un "mini-aquarium" fabriqué avec deux lames de microscopes. D'autres tests biologiques du même type, encore plus simples et plus précis sont en cours de développement, et, nous l'espérons, seront mis sur le marché.

En cas d'infestation par l'algue verte non toxique chlorelle (par exemple suite à des récoltes trop fortes), on peut essayer de jouer sur le fait que ces algues décantent au fond où, privées de lumière, elles mourront: mais cette méthode reste délicate d'application car l'agitation générale du bassin doit être stoppée et remplacée par une agitation très modérée, en surface, mais suffisante pour que les spirulines elles-mêmes ne meurent pas par asphyxie ou photoxydation (l'ombrage est pratiquement nécessaire). Si la concentration de la culture est trop basse, un réensemencement massif du bassin en spirulines flottantes peut être nécessaire. En cas d'infestation par des algues suffisamment petites pour passer en grande majorité dans le filtrat lors de la récolte, comme c'est d'ailleurs le cas pour les chlorelles, il est possible de les éliminer du filtrat par plusieurs moyens: refiltration à travers un filtre plus fin (filtre à sable par exemple), stérilisation par les U.V., par la chaleur ou chimique. Des traitements répétés à 17 ppm d'ammoniac empêcheraient la prolifération des chlorelles au-delà du niveau de concentration d'un million/ml de culture (BIBLIOGRAPHIE - Vonshak1997, page 91).

A moins d'exercer une surveillance constante, il parait prudent de faire une vidange totale ou une stérilisation des bassins de temps en temps (par exemple tous les 2 ans).

7.13) Contamination par micro-organismes

Dans le milieu de culture, au pH élevé (> 9,5) où l'on travaille, la majorité des microbes dangereux pour l'homme sont inactivés en deux jours. Attention aux cultures à pH < 9,5 (cultures jeunes à base de bicarbonate, ou trop forte injection de CO2), qui risquent de ne pas bénéficier de cet effet protecteur. Les cultures contiennent par ailleurs des microbes biodégradeurs adaptés au milieu de culture et qui jouent un rôle bénéfique, à côté du zooplancton, en purifiant le

milieu et en recyclant des nutriments, tout en aidant à éliminer l'oxygène et en fournissant du gaz carbonique.

Des germes de moisissures sont toujours présents dans les cultures car des moisissures apparaissent régulièrement sur le flottant laissé longtemps sans agitation (comme à la surface des confitures artisanales), et l'analyse bactériologique décèle couramment de 5 à 500 colonies/g, sans qu'aucune norme n'ait été imposée dans la plupart des pays. L'usage du sucre comme apport de carbone provoque une augmentation de microorganismes filamenteux incolores, probablement champignons, qui gênent la filtration mais ne se retrouvent pratiquement pas dans le produit fini.

7.14) Empoisonnement chimique

Un gros excès d'urée ou d'ammoniac provoque la mort de la majorité des spirulines, le milieu de culture devenant "laiteux" et des boues abondantes se formant; mais en général il y a assez de survivantes (sinon on peut réensemencer) pour régénérer spontanément la culture en une dizaine de jours si l'on prend la précaution d'ombrer. Dans une série d'expériences on a trouvé qu'une dose de 8 ppm de chlore actif apporté par l'eau de Javel (hypochlorite de sodium) tue les spirulines à pH < 9, mais qu'elles résistent à 4 ppm; à pH 10,6 elles ont résisté à une dose de 12 ppm (mais l'effet du chlore varie suivant la demande en chlore - teneur en matières chlorables du milieu). N.B. : l'eau de Javel commerciale concentrée titre 15 % de chlore actif, l'eau de Javel ordinaire 3,8 %. Seule la fraction non dissociée de l'acide hypochloreux est active : à pH 8 elle est égale à 0,24 mais à pH 9 elle tombe à 0,03.

Les détergents et les sucres ne sont pas toxiques à la dose de 100 ppm.

7.15) Manque d'oxygène (hypoxie)

Si l'oxygène peut être considéré comme un poison pour la spiruline quand il est en forte sursaturation pendant la photosynthèse active, ce n'est pas le cas en l'absence de lumière puisque la spiruline a alors besoin d'oxygène pour respirer, comme les autres microorganismes aérobies présents. La teneur en oxygène du milieu de culture en équilibre avec l'air atmosphérique est donnée par la formule approchée suivante: mg/l ou ppm d'oxygène = 0,616 x (pression atmosphérique en mmHg) x (1 - 0,0009 x altitude en m.)/(31,64 + T° C) - 0,035 x (salinité en g/l), soit par exemple 8 ppm à 25° C.

A pic de la période de photosynthèse active la teneur en oxygène du milieu de culture peut largement dépasser la saturation et monter à plus de 30 ppm. Mais la respiration de la spiruline consomme 1,2 g d'oxygène par g de spiruline "brûlée" soit facilement 3 g d'oxygène/m² /nuit, et de l'oxygène est aussi consommé par les autres microorganismes, surtout si le milieu contient du sucre et d'autres produits biodégradables; de la sorte le taux d'oxygène dans le milieu chute rapidement après l'arrêt de la photosynthèse, surtout si la concentration en spiruline est élevée. Comme l'a montré Falquet on atteint facilement l'anoxie en présence de 100 ppm de sucre, même en agitant la nuit. De l'oxygène de l'air se dissout dans le milieu dès que celui-ci est en dessous de sa concentration d'équilibre, mais cet effet est négligeable s'il n'y a pas d'agitation. On évalue l'absorption d'oxygène de l'air, en g/heure/m² , par la formule très approchée tirée de l'expérience piscicole = 0,3 x (puissance d'agitation, W/m²) x (concentration en oxygène à l'équilibre - concentration actuelle, en ppm), soit par exemple pour un bassin agité en continu avec 1 W/m² et contenant 200 l/m² à 5 ppm d'oxygène : 11 g d'oxygène/m² /nuit. Il n'est donc pas étonnant que le fond d'un bassin non agité pendant la nuit manque d'oxygène et que les boues subissent une

fermentation anaérobie avec formation de bulles de gaz insoluble (méthane) entraînant des remontées de boues vers la surface. Pour combattre cette situation, on peut agiter le dépôt de boues au balai et maintenir l'agitation de la culture la nuit, mais le plus efficace est d'enlever régulièrement l'excès de boues du fond du bassin. On enlève ces boues soit en transférant la culture dans un autre bassin, soit en aspirant le fond par pompe ou siphon. Le mélange de boues et de milieu de culture éliminé peut être recueilli dans une bassine pour décanter les boues et recycler la majorité du milieu de culture.

Les spirulines ne semblent pas souffrir en cas d'anoxie pendant quelques heures par nuit.

7.16) Maladies

Il arrive, très rarement, que des spirulines présentent des déformations, ou une boursouflure, ou alors des excrétions jaunes à une extrémité ou sur un côté des filaments, faisant penser à un éclatement de la paroi avec épanchement du contenu des cellules (spirulines dites "étripées"). Dans la pratique, ces anomalies disparaissent d'elles-mêmes au bout de quelques jours de marche dans des conditions normales.

Photos de spirulines "étripées" vues au microscope, Ecole d'agriculture Don Bosco à Linares (Chili), 1998 :



7.17) Métaux lourds

La spiruline absorbe très facilement les métaux lourds présents dans le milieu de culture. Certains sont toxiques pour l'homme (mercure, plomb, cadmium). On trouvera en Annexe A17 A.htm - normes les de teneurs maximum en métaux lourds autorisées en France dans la spiruline.

7.18) Nettoyage des bassins

La meilleure méthode est de transférer le contenu du bassin dans un bassin voisin, puis de brosser les bords et le fond, en rinçant. Attention aux recoins (plis du film plastique dans les angles). Il y a souvent un dépôt blanc incrusté sur le film : il s'agit de calcaire, qu'on peut enlever par badigeon d'acide chlorhydrique dilué, qui a l'avantage de stériliser en même temps (on y a recours surtout lors des changements de souche).

8. RECOLTE

Il vaut mieux récolter le matin car la teneur de la spiruline en protéines y est généralement plus élevée que le soir, mais aussi pour d'autres raisons: chaleur excessive ensuite, nécessité de mettre la récolte à sécher dès que possible (surtout en cas de séchage solaire si le beau temps n'est pas assuré l'après-midi). La filtration sous plein soleil est fortement déconseillée car la biomasse sur les bords du filtre devient rapidement brune et salit la toile de filtration. Par temps couvert cette obligation de récolte tôt le matin est évidemment moins impérieuse, et par beau temps on peut toujours ombrer le filtre. Quelque soit le temps, si l'on opère en plein air, il faut couvrir le filtre pour éviter que la biomasse récoltée ne se salisse. Quand cela est possible il est très avantageux d'aménager un poste de récolte à l'abri du soleil et des poussières, de préférence dans un bâtiment.

8.1) Filtration

La récolte consiste à filtrer une partie de la culture sur une toile fine (maille 25 à 60 µ), en recyclant le filtrat dans le bassin. La culture est envoyée au filtre à travers un tamis de maille 300 µ destiné à intercepter les corps étrangers tels qu'insectes, larves, feuilles, boues ou grumeaux de spirulines. Un tamis de maille plus fine peut être nécessaire pour arrêter d'éventuels rotifères (l'ouverture de maille est choisie pour ne pas arrêter trop de spirulines).

La toile de filtration peut être simplement posée sur un grand tamis à bords de 10 cm de haut ou une grande passoire, mais un sac ou bien un tube (cf fin de ce §) peuvent êtrre préférés. Les cadres de sérigraphie (toile très tendue sur un cadre, comme une peau de tambour) peuvent servir aussi de filtres, mais sont trop coûteux et fragiles, sans offrir d'avantage décisif. Il est intéressant, mais non obligatoire, que la toile de filtration soit tendue plane (dans le cas d'un sac c'est le poids du liquide qui tend la toile) pour faciliter son décolmatage avec une pelle à bord droit et aussi pour ramasser la biomasse si elle colle. Dans le cas de la filtration en tube on ne décolmate pas.

On peut pomper la culture (pompe d'un type ne cassant pas les spirulines : vérifier au microscope), ou la siphonner ; pour la récolte manuelle, on utilise des bassines à bords de préférence droits; de toutes façons il faut veiller à ne pas remuer trop le fond du bassin, pour ne pas mettre en suspension les boues du fond, lors du prélèvement. Bien que le tamis arrête les boues les plus visibles, de fines particules sont cependant presque toujours entraînées dans la spiruline récoltée: il s'en dépose dans le tissu à l'endroit de l'arrivée de culture à filtrer (s'il y en a beaucoup, la toile, surtout de maille fine, se colmatera assez vite et l'on peut être amené alors à la nettoyer au jet d'eau en cours de récolte). On facilite la filtration, lorsqu'une couche de biomasse s'est formée sur la toile, en raclant la toile pour la décolmater : on utilise pour cela une pelle en plastique et l'on a intérêt, lorsque la filtration est lente, à sortir le contenu de la pelle et à le mettre à égoutter à part.

Après arrêt de l'envoi de culture sur le filtre (éviter d'abaisser la concentration en spirulines en dessous de 0,4 g/litre), on laisse égoutter puis on rassemble la pâte verte obtenue, dite "biomasse".

La biomasse de spirulines spiralées ou ondulées contenant moins de 75 % de spirulines droites et provenant d'une culture en bon état, de pH et teneur en ammonium pas trop élevés, se filtre et s'essore facilement par pressage. Souvent la biomasse égouttée sur le filtre se rassemble facilement en la faisant rouler sur elle-même comme pour former une boule (comme pour faire une boule de neige) ; cette biomasse ne colle pas au plastique. D'autres types de biomasses ne font pas de boule et collent au plastique mais se laissent essorer facilement. Au contraire, les biomasses trop riches en droites, ou provenant d'une culture "vieille" ou "fatiguée" par trop de soleil ou une croissance trop rapide, ou trop riche en matières organiques dissoutes (sucre compris) donnent une "crème" collante,

qu'on doit ramasser à la louche ou à la pelle en plastique, et qui ne peut pas s'essorer..

Photo : Une belle "boule" (biomasse riche en spirulines Spiralées) :



On peut laisser finir d'égoutter la biomasse en sac suspendu. La biomasse égouttée contient 8 à 12 % de matière sèche pour un milieu de culture de salinité habituelle.

Comme décrit au § 7.9 (CULTURE.htm - EPS), les grumeaux de spiruline retenus sur le tamis peuvent être récupérés.

Une toile de filtre en polyamide (Nylon) ou en polyester (Tergal) est préférable à une toile en coton parce qu'elle facilite le décollement de la biomasse récoltée. Les toiles en monofilaments à usage industriel sont préférées, mais il est possible de se contenter de tissus d'habillement convenablement choisis (et 5 à 10 fois moins coûteux). La durée de vie d'une toile de filtration en tissu synthétique sera d'autant plus courte qu'on la laissera plus exposée au soleil. Les toiles finissent par se percer ou se déchirer. Le polyester est plus solide que le polyamide (nylon) et il est donc préféré. Cependant il est tout-à-fait possible d'utiliser un tissu en coton (drap) à condition de bien le choisir et à condition que la biomasse soit de "bonne" qualité (non collante) sinon elle passe à travers la toile coton. Ne pas hésiter à laver les toiles à la machine à laver de temps en temps pour déboucher les pores, et à

repasser les toiles en tissu synthétique, à fer pas trop chaud, pour éliminer les plis qui se forment à la longue et gênent la filtration. Ne pas abuser de l'eau de Javel qui risque d'accélérer le vieillissement des toiles.

La récolte manuelle de la couche flottante (lorsqu'elle se forme) à l'aide d'une bassine à bord droit est avantageuse car elle permet l'obtention d'un concentré de spirulines à environ 3 - 6 g/l, donc avec (par rapport au poids sec) environ dix fois moins des produits colmatant se trouvant éventuellement dans le milieu, et elle est rapide. Si l'on dispose de plusieurs bassins, on a intérêt à poser le filtre sur un autre bassin que celui dont la couche flottante est récoltée, de manière à ne pas la perturber par le filtrat. Comme les spirulines spiralées flottent plus vite que les ondulées et les droites, il ne faut récolter la couche flottante qu'en cas de culture 100 % spiralée ou à flottation totale, sinon la culture s'enrichirait en spirulines non flottantes (droites par exemple) qui finiraient par prendre brusquement le dessus (cf programme de calcul drimpr.exe) : surveiller l'évolution du % des différentes formes - surtout des droites - dans la culture au cours du temps. Il arrive que même les ondulées et les droites flottent complètement (ceci se produit notamment à l'obscurité lorsqu'il y a peu d'oxygène, par exemple en récipient fermé ou très peu aéré, avec environ 1 ppm d'oxygène dissout). Il serait certainement intéressant d'utiliser le dispositif suivant pour récolter des spirulines flottant à 100% (mais nous ne l'avons pas essayé) : transférer la culture dans une cuve profonde où se produirait une flottation totale, puis injecter de l'eau au fond pour récupérer la couche flottante par débordement.

Si la flottation n'est pas totale (on s'en aperçoit d'après l'aspect du milieu sous la couche flottante), mieux vaut homogénéiser la culture avant de récolter (laisser seulement décanter les boues 5 minutes). Pour réduire la concentration en droites, on peut récolter par pompage près du fond, là où il y a la plus grande concentration en droites..

Photos:

Filtration sur bassin de 6 m² à Mialet, 1998 :



Filtration à la Coopérative Agro-Piscicole de N'dress, Bangui (RCA), 1995 :



Un rapetissement de la taille des spirulines peut être provoqué par une vitesse de croissance très rapide ou une salinité ou un pH trop élevés, ou provenir de la souche, ou d'une trop forte luminosité (spirulines type Lonar dont les spires deviennent tellement serrées qu'elles se touchent). Dans ce cas, utiliser une toile de maille fine (25 à 35 microns), sinon il y aura des fuites importantes de spirulines à travers la toile surtout lors des décolmatages, d'où un mauvais rendement de filtration et une sélection aboutissant à enrichir le bassin en spirulines de plus en plus petites. Une toile à maille fine convient d'ailleurs dans tous les cas, elle est donc recommandée mais elle est deux fois plus chère ; elle s'impose pratiquement dans le cas de souche 100 % spiralée en plein été. Un certain pourcentage de droites ou d'ondulées facilite la filtration et peut éviter la nécessité de la maille fine.

Pour une filtration facile, il est bon d'avoir au moins un quart de formes spiralées, de préférence grandes. A 10 % de spiralées et pH 11, ou 4 % et pH 10, la filtration est encore possible mais plus pénible. On peut apprécier la filtrabilité en faisant un test simple décrit en Annexe A6.1. Si toutes les spirulines sont de forme droite, le colmatage est si rapide que la filtration peut être jugée impossible. Si la biomasse devient habituellement infiltrable, ne pas hésiter à changer de souche.

La vitesse de filtration par gravité varie suivant le type de filtre, la concentration de la culture, et les mouvements imprimés à la toile ou à la biomasse pour décolmater. Une vitesse de filtration considérée comme bonne fournit de l'ordre de 300 g (de spiruline sèche)/heure/m² de surface filtrante.

Pour accélérer la filtration on peut utiliser le vide produit par un aspirateur ménager (voir A.htm - filtration) ou la pression.

La filtration sous pression se fait en tubes confectionnés en tissu de filtration, de diamètre 5 à 6 cm, alimentés par gravité ou par pompe et fermés par une pince ou un noeud. Ces tubes peuvent être disposés horizontalement dans le bassin même, mais de préférence ils sont suspendus verticalement au-dessus du bassin ou dans la salle de récolte. Une rampe de plusieurs tubes d'une longueur de 1 mètre se révèle pratique. Le tamis est disposé en amont de l'aspiration de la pompe. Il est important que la pression dans le tube ne dépasse pas 1 m de colonne d'eau sinon la maille du tissu risque de s'agrandir sous l'effet de l'excès de pression et le rendement de filtration en souffrirait.

Le choix entre filtres plats, en sacs ou en tubes est une affaire de goût personnel, mais si le poste de

filtration n'est pas à l'abri des salissures (poussières, insectes) le tube doit être préféré puisqu'il protège la biomasse.

8.2) Lavage et Essorage

Certains producteurs tiennent à neutraliser à l'eau acidifiée et/ou à laver à l'eau douce leur biomasse avant de l'essorer et de la sécher, au risque d'en perdre une partie par éclatement des cellules.

Si certaines spirulines supportent le lavage à l'eau douce, d'autres se décolorent ou éclatent à son contact et ne peuvent être lavées qu'à l'eau salée ou avec du milieu de culture neuf à la même salinité (ou plus exactement à la même force ionique) que le bassin récolté. En effet les spirulines mises en contact avec un milieu de salinité différente de leur milieu d'origine réagissent quasi instantanément en absorbant ou perdant de l'eau pour se mettre en équilibre osmotique avec le milieu, ce qui peut faire éclater leur paroi.

Le lavage risque aussi de causer des contaminations microbiennes : d'une part si l'eau utilisée n'est pas pure, d'autre part parce que la baisse du pH rend la biomasse plus fermentescible.

Une biomasse provenant d'une culture en bon état n'a nul besoin d'être neutralisée ni lavée, seulement essorée. Il ne faut laver la biomasse que si on doit récolter alors que la culture est sale ou malodorante, ou si l'essorage est impossible.

Par contre l'essorage est nécessaire en l'absence de lavage. L'essorage peut se pratiquer avec une essoreuse ou sur filtre à vide (trompe à eau ou pompe à vide), mais plus simplement par pression de la manière suivante: la biomasse égouttée est placée dans une toile du même type que celle utilisée pour la filtration, doublée à l'extérieur par une toile en coton solide - les deux toiles étant repliées sur la biomasse - et elle est pressée entre deux nattes ou planches rainurées: la majeure partie de l'eau libre est exprimée par la pression (0,2 kg/cm² suffit mais on peut monter à 1 kg/cm²). La presse peut n'être qu'une pile de poids, mais un pressoir à vis supérieure est pratique et plus propre, surtout s'il est en inox, comme celui représenté sur la photo suivante :

Photo : Pressage de biomasse à l'aide d'un pressoir à jus de fruits, Mialet, 1998 :

:

convenablement, est de consistance très ferme, non collante et donne une tranche nette au couteau, et son pH est de 7 à 9 (selon degré de pressage; en fait 9 parait préférable pour le séchage et la conservation, donc ne pas presser absolument à fond). La spiruline spiralée essorée contient habituellement autour de 20 % de sec (plus pour les ondulées et les droites) si elle provient d'une culture de salinité normale (10-13 g/l) et s'il n'y a pas eu de lavage ou si le lavage a été fait avec une eau à la même salinité (ou plutôt à la même "force ionique") que le milieu de culture. Un milieu (type Zarrouk) ou une eau de lavage de salinité 20 g/l donne un % de sec majoré de 5 points, une eau salée à 30 g/l donne un % de sec majoré de 10 points (et un goût plus salé), par contre le lavage à l'eau douce donnera souvent un % de sec minoré de 5 points (et au goût "fade"). Les milieux de culture à base de cendres ou de bicarbonate de potassium donnent, à salinité égale (mais force ionique inférieure puisque le poids atomique du potassium est supérieur à celui du sodium), un titre en sec inférieur. Les spirulines ondulées donnent des biomasses pressées plus riches en matière sèche (environ 2,5 points audessus des spiraleés) ; leurs % de sec plafonnent cependant à 33 % à partir d'une salinité de 44 g/l (en NaCl). Bien distinguer six facteurs indépendants régissant le % de sec du produit pressé : la souche, la forme des filaments au sein d'une même souche, la salinité du milieu de culture, la quantité de biomasse essorée en une fois, la pression appliquée (ou le vide, ou la force centriguge) et sa durée.

Si la biomasse est "fragile" ou très riche en droites, n'appliquer qu'une pression (ou un vide ou une force centrifuge) modérée et progressive et la laisser agir plus longtemps (par exemple 30 minutes) : cela est généralement efficace et permet d'obtenir une biomasse extrudable.

L'avantage de l'essorage par le vide ou par essoreuse est de permettre le traitement de biomasses égouttées peu concentrées, par exemple à 7 % de matière sèche, presque liquides, alors que le pressage est difficile voire impossible à mettre en œuvre dans ce cas-là.

Dans certains cas, surtout quand il y a de 90 à 100 % de droites, la biomasse ne se laisse pas essorer en une biomasse extrudable (les spaghetti, même si on arrive à les former, "fondent" au séchage), mais elle peut être lavée, puis étalée à la spatule en couche mince (1 mm) sur un film de polyéthylène tendu horizontalement pour séchage rapide au soleil ou sur un plateau d'étuve à aération latérale. Cette méthode (cf § 9 flocons) doit être utilisée avec prudence, surtout si le lavage se fait à l'eau douce: le séchage doit être très rapide parce que la biomasse lavée à l'eau douce fermente vite et il est recommandé de faire des analyses bactériologiques plus fréquentes sur le produit séché ainsi obtenu. La réussite de ce type de séchage dépend fortement de l'épaisseur de la couche de biomasse étalée: si la répartition n'est pas bien faite, les parties les plus épaisses sècheront mal, prendront une mauvaise odeur, et ne pourront pas servir à l'alimentation humaine. Cette méthode de séchage, que j'appelle "méthode indienne" (parce qu'elle est pratiquée couramment par exemple dans l'Etat du Tamil Nadu en Inde du Sud), peut s'appliquer aussi aux biomasses qui se sont laisées presser correctement mais qui restent trop molles pour être extrudées (dans ce cas, pas de lavage, mais éventuellement une petite redilution pour faciliter l'étalement en couche mince). Cette méthode donne des écailles ou flocons de spiruline d'un fort bel aspect, préféré par certains consommateurs, mais dont la densité apparente est très faible. Elle présente l'inconvénient que le support de séchage (film plastique) est assez difficile à nettoyer lorsqu'il n'est plus neuf, alors que les moustiquaires ou grilles n'ont pas besoin de nettoyage ou se lavent instantanément au jet d'eau. Enfin les flocons obtenus par cette méthode ont une fâcheuse tendance à se charger électriquement ainsi que le film plastique, qui s'attirent alors mutuellement.

La biomasse non essorée et non lavée à l'eau, ou pas assez, brunit rapidement au soleil.

8.3) Lavage des outils (voir aussi § 11 4.htm - Hygiène)

On a intérêt à rincer dès que possible, ou au moins à mettre à tremper, les outils, toiles, récipients, instruments ayant été en contact avec la spiruline; sinon, si la spiruline sèche avant nettoyage, elle devient très difficile à nettoyer et il peut s'ensuivre une consommation d'eau de lavage exagérée. Les toiles de filtration et de pressage doivent être lavées et séchées après usage pour garder leur efficacité et éviter qu'elles ne prennent des odeurs; attention: pour qu'elles durent longtemps, ne pas les exposer trop au soleil.

Un lavage des toiles de filtration et de pressage à la machine à laver avec détergent est pratique et recommandé au moins de temps en temps.

* * *

9) SECHAGE

Le séchage est le seul moyen sûr de conserver et de distribuer la spiruline sans chaîne de froid. Si la spiruline pressée ne peut être séchée de suite, il faut la conserver en récipient fermé au réfrigérateur bien froid et pas trop longtemps (sinon elle dégage une odeur desagréable lors de l'extrusion) ; attention à ne pas congeler et à éviter les retombées de gouttes d'eau condensée sur la biomasse en cours de stockage. En chambre froide à 1° C la biomasse peut se conserver jusqu'à une semaine. La biomasse lavée ne peut se conserver, même au réfrigérateur.

9.1) Extrusion

Le séchage doit être suffisamment rapide pour que le produit sèche sans fermenter. La biomasse issue du pressage est d'abord répartie par extrusion en "spaghetti" sur un plateau formé d'un cadre garni d'une moustiquaire en nylon ou mieux en inox (maille 1 mm) ou sur une grille en plastique (à maille de l'ordre de 5 mm). Si la biomasse est trop fluide, on l'étale en couche mince sur un film de polyéthylène (méthode "indienne"). Puis la biomasse est séchée au soleil, ou, beaucoup mieux, dans un courant d'air à faible humidité relative et forte capacité d'absorption d'eau (séchoir solaire indirect, ou électrique, ou à gaz, ou déshumidificateur), jusqu'à ce qu'elle ne soit plus molle du tout, se détache facilement du support, et se broie facilement.

L'extrusion en spaghetti peut se faire à l'aide d'un décorateur de gâteau, ou avec un instrument de cuisine courant en Inde ("idiyapam maker" au Tamil Nadu) et en Extrême-Orient (fait d'une boite à fond percé de petits trous et d'un piston, ou à l'aide d'un pistolet à colle silicone professionnel type Sika, modifié (bouchon PVC de 50 mm percé de trous de 2 mm), ou avec un poussoir à saucisses, etc. Choisir un modèle ne comportant pas de pièce en aluminium au contact de la biomasse. En déposant les spaghetti sur le support (plateau de séchage) éviter de former de gros amoncellements de biomasse, qui ne sècheraient pas assez vite. Si la biomasse est très ferme on peut l'extruder avec une filière à plus gros trous (ce qui est moins pénible) que si elle manque de fermeté. Il existe un pistolet SIKA actionné par air comprimé, qui évite la fatigue de la main, mais nécessite de mettre le produit en "saucisses" avant extrusion. Si l'on désire obtenir des spaghetti bien droits il faut que l'épaisseur du bouchon dans lequel les trous sont percés soit triple du diamètre des trous (utiliser une perceuse à colonne). Dans le cas d'utilisation du pistolet SIKA de 300 ml, nous avons remarqué qu'il est nécessaire de doubler le piston par un feuille en film plastique pour éviter un by-pass excessif de biomasse derrière le piston ; nous avons aussi remarqué que ce piston se déforme à la longue (le changer alors).

Photo : Extrusion de biomasse pressée, avec pistolet à silicone Sika (professionnel, type manuel "à poche"), sur un plateau de séchoir électrique Stoeckli, Mialet, 1998 :



9.2) Séchage

On peut sécher à l'ombre simplement dans un courant d'air à température ambiante, sous moustiquaire (il suffit que l'air soit à température nettement supérieure à son point de rosée) ; c'est le même principe que le séchage du linge sur la corde ou de la vaisselle sur le vaisselier : ainsi nous avons pu sécher très bien dans une hotte de laboratoire munie d'un puissant ventilateur et d'un filtre 0,2 µ (arrêtant les bactéries), sans chauffage. Mais la teneur finale en eau du produit paraissant sec peut être décevante ; elle dépend essentiellement de la température et de l'humidité de l'air, du débit de ventilation et de la durée du séchage. Généralement il faut terminer la déshydratation dans un séchoir à air chaud ou avec un déshumidificateur.

Nous avons séché facilement la spiruline dans une armoire métallique munie d'un déshumidificateur et d'un ventilateur recyclant l'air à travers les plateaux de séchage. Le déshumidificateur doit être capable d'abaisser l'humidité relative de l'air à 30 %. Ce dispositif, qu'on peut appeler "séchoir thermodynamique", permet de s'affranchir totalement de l'humidité de l'air ambiant et des poussières. Il permet même, si l'on veut, de remplacer l'air par un gaz neutre ou appauvri en oxygène pour réduire l'oxydation de la spiruline en

cours de séchage (meilleure préservation du béta-carotène). Le seul problème est qu'il faut refroidir l'armoire pour éviter de dépasser 45° C à l'intérieur. En climat chaud et humide cela peut obliger à recourir à un climatiseur, à moins de sécher de nuit. On obtient 40-50 g de spiruline sèche par heure avec une puissance de 350 Watt (hors climatiseur).

Le séchage au plein soleil en plein air est le plus rapide et le moins coûteux, mais il a des inconvénients : le produit est exposé aux poussières et aux animaux (il faut au minimum le protéger par une moustiquaire), et il risque de bleuir en surface par destruction de la chlorophylle par les ultra-violets ; après broyage ce bleuissement n'est plus perceptible, mais une altération du goût reste sensible. Ce type de séchage réussit bien si les conditions sont bonnes pour un séchage très rapide: s'il est suffisamment rapide ou si la lumière solaire est suffisamment pauvre en ultraviolets, l'altération de la couleur et du goût peut être imperceptible.

Des plans de séchoirs solaires sont donnés en Annexe A.htm - A27. Un séchoir solaire amélioré comporte une partie chauffage de l'air séparée de la zône où se trouve la spiruline, à l'abri de la lumière, de la pluie et des insectes (plan A.htm - Villard) ; l'air doit y circuler avec un bon débit provoqué de préférence par ventilateur. Le thermosiphon (effet de cheminée) ne convient que s'il y a peu de "spaghetti" sur les plateaux. L'influence de la ventilation sur le séchage est primordiale. Avec un fort débit d'air on peut empiler jusqu'à 3 cm de "spaghetti" sur les plateaux. Si un ventilateur à moteur axial est utilisé pour souffler de l'air à travers des plateaux tout proches, bien tenir compte que le débit est souvent très faible à proximité du centre du ventilateur : on a intérêt à interposer un plateau intercalaire vide servant de répartiteur de flux d'air.

Si l'air est chauffé pour abaisser son degré d'humidité relative, la température doit être limitée à 65° C.

Le temps de séchage varie selon l'épaisseur de biomasse fraîche sur chaque plateau, mais aussi selon le nombre de plateaux superposés, le % de sec dans la biomasse, la souche (les spiralées sèchent un peu plus vite), la température et l'humidité de l'air et, bien sûr, le débit d'air : dans la pratique, en général il se situe autour de 4 heures, mais il est parfaitement possible de sécher en une heure si l'on veut. En cas de mauvais temps, si on utilise un séchoir solaire, on peut lui adjoindre un radiateur électrique ou à gaz, ou bien le séchage peut se terminer (ou se faire entièrement) dans un séchoir électrique ou à gaz ou bien même dans un four à pain à basse température et aéré.

Un séchoir électrique pour fruits et légumes, comme l'appareil suisse de marque Stöckli, de puissance 450 Watt, avec plateaux de 30 cm de diamètre, a une capacité moyenne de séchage de 20 g (compté en sec) par heure. Son débit d'aération est faible.

Si l'on n'a pas d'électricité, on peut utiliser un séchoir chauffé au gaz (butane ou méthane de digesteur) - dont une esquisse est représentée en annexe A27 (A.htm - ancel). Il est très important de munir le brûleur d'une sécurité.

La température de la biomasse en cours de séchage dans un séchoir à plateaux superposés sans recyclage de l'air (cas du Stöckli) reste théoriquement proche de la température de rosée de l'air, quelle que soit la température sèche de celui-ci, tant qu'il reste de l'eau libre à la surface de la biomasse ; pratiquement la température de surface s'établit à mi-chemin entre cette température de rosée et la température de l'air, en début de séchage, puis monte graduellement pour rejoindre la température sèche de l'air en fin de séchage. La température au coeur du produit s'élève graduellement de sa température initiale jusqu'à la température de l'air. Il est souhaitable de minimiser le temps où le produit humide est au voisinage de 37° C, température la plus favorable à la fermentation. Il faut aussi éviter de porter à plus de 60 ° C le produit encore humide (au cœur des spaghetti) qui risquerait de "cuire" en se décomposant (changements de couleur). Le premier plateau reçoit l'air à sa température maximum mais avec température de rosée minimum (voisine de 20° C habituellement), tandis que les plateaux supérieurs reçoivent un air encore chaud mais chargé d'humidité, donc à température de rosée élevée et d'autant plus que le débit d'air est faible. On voit l'intérêt de limiter le nombre de plateaux superposés et de ne pas gêner le débit d'air (maintenir propres et dégagées les filtres ou moustiquaires protégeant l'entrée et la sortie de l'air de l'appareil). Dans la pratique, avec les séchoirs Stoeckli, qui ont un faible débit d'air, nous limitons absolument le nombre de plateaux à 5 et leur charge individuelle à 2 kg de biomasse fraîche par m² de plateau (soit 150 g/plateau). Si l'on charge trop de biomasse fraîche par rapport au débit d'air, ou si la biomasse est trop molle, ou si le temps est trop humide, ou si le thermostat est réglé trop bas, le séchage ne se fait pas assez rapidement, la spiruline commence à se détériorer avant d'être sèche, elle dégage une odeur anormale ("propionique" ou "butyrique") et parfois les "spaghetti" s'aplatissent ("fondent"), restent comme du plastique mou et ne se décollent pas du plateau : dans ces cas, il vaut mieux réserver le produit à l'alimentation animale ou le jeter. Une spiruline mal séchée est généralement trop molle pour pouvoir être broyée, ce qui est un indice, mais attention: il arrive que l'on ne s'aperçoive pas qu'une détérioration a eu lieu car le produit peut quand même paraître sec et bien vert en surface alors qu'il est mou et noirâtre à l'intérieur, ou bien il a pu changer de couleur et finir par sécher quand même ; il est donc important de vérifier la qualité du produit sec d'après son odeur et son goût et de le piquer avec une pointe de couteau pour vérifier s'il est dur et vert à cœur. Le dégagement d'odeur en début de séchage ne signifie pas forcément que le produit sec soit de mauvaise qualité ou de mauvais goût.

Actuellement nous séchons la spiruline en deux stades, surtout lorsque l'air est humide :

a) un séchage à basse température (< 40-50° C) mais gros débit d'air (vitesse d'air de 1 m/s) autorisant une charge élevée (20 kg de biomasse fraîche par m², en 5 plateaux), durée 2,5 à 3 heures pour une teneur en eau finale de 15 - 20 %, et une humidité relative de l'air sortant de 10 à 20 %

b) un séchage à débit d'air faible (en séchoir Stoeckli) à 65° C, assurant l'extraction de l'eau jusqu'à 4 % d'eau en une demi-heure à une heure.

La charge maximum indiquée est pour une biomasse pressée de bonne qualité (ferme) ; si elle est molle il faut réduire la charge à 10 voire 5 kg/m².

Le séchoir du premier stade a été réalisé autour d'un ventilateur de 50 W de diamètre 30 cm correspondant à celui des plateaux Stoeckli qui sont posés dessus. Ce ventilateur aspire à travers un filtre à poussières (ouate synthétique vendues pour garnir les hottes de cuisine) un air préchauffé par un radiateur électrique soufflant (1 à 2 kW).

Le premier stade suffit lorsque l'air est sec (séchage à moins de 9 % d'eau en 4 heures).

Un autre mode de séchage, donnant des flocons d'un bel aspect, est celui où l'extrusion est remplacée par un étalement en couche mince avec une spatule.

Test de fin de séchage : cf § suivant 9.5.

Pour établir la courbe du % d'eau dans le produit en fonction du temps de séchage, il suffit de mesurer le poids brut des plateaux en cours de séchage, la tare des plateaux, le poids de biomasse à sécher, le poids net sec et de connaître le % d'eau en début ou en fin de séchage. Pour faciliter le calcul deux petits programmes sont disponibles : humidite.exe à partir du % d'eau en fin de séchage et humidit2.exe à partir du % d'eau de la biomasse pressée.

Pour faciliter le calcul de la production et des % de matière sèche dans les biomasses égouttées et pressées un autre petit programme est proposé : rec.exe.

Au cas où le séchage a été insuffisant il est possible de le compléter soit par un nouveau passage au séchoir à 65° C (en mettant le produit sur des assiettes s'il a déjà été broyé), soit de préférence en l'enfermant dans un récipient étanche en compagnie d'un sachet deshydratant (gel de silice ou tamis moléculaires). Ces deshydatants sont régénérables par passage au four.

9.3) Broyage

La spiruline bien séchée est craquante, se détache toute seule du support de séchage et se laisse facilement piler ou broyer au moulin à café en une poudre plus ou moins fine selon le goût de chacun. Un broyeur manuel bien adapté est celui de marque Sfinx ou Corona très répandu dans beaucoup de pays d'Afrique et d'Amérique Latine. La densité apparente de la spiruline extrudée, séchée et broyée est de 0,66 kg/litre. Elle doit contenir moins de 9 % d'eau pour bien se conserver. La mesure de la teneur en eau est très facile et rapide avec le dispositif suivant (voir Annexe A6.2.6 : A.htm - humidité) : mettre le produit à tester (environ 200 g) dans un récipient genre "Tupperware" d'environ un litre, transparent pour permettre la lecture de l'hygromètre placé à l'intérieur. Un produit suffisamment sec doit donner un % d'humidité relative à l'équilibre inférieur à 49 (vers 25° C). Pour que la mesure soit exacte il faut que l'ensemble de mesure soit en équilibre non seulement d'humidité mais de

température, ce qui peut exiger un temps assez long (1 à 2 heures).

Certains préfèrent ne pas broyer la spiruline sèche pour lui conserver sa "texture".

9.4) Conditionnement

La spiruline sèche peut se conserver longtemps sans perdre trop de ses qualités à condition d'être stockée en sachets bien remplis et étanches, à l'abri de la lumière, de l'air (emballage plastique métallisé et thermoscellé pour éviter la pénétration de l'oxygène), et des fortes chaleurs. Il est préférable de faire le vide dans le récipient tout en le thermoscellant (des appareils commerciaux existent pour cela): dans ce cas le produit peut se conserver 5 ans. Si l'on ne peut pas sceller sous vide, l'absorption de l'oxygène restant dans le sachet convenablement scellé provoquera souvent (mais pas toujours) sa mise sous vide spontanée en quelques jours si le récipient est bien scellé ; cette absorption d'oxygène s'accompagne de la destruction d'une fraction des composants oxydables de la spiruline, comme le béta-carotène, mais cette fraction "sacrifiée" reste faible s'il y avait peu d'air résiduel.

Attention : les rongeurs percent volontiers ces sachets de spiruline. Il faut les conserver en un lieu sûr, par exemple dans une cantine métallique.

9.5) Contrôle de qualité

Le séchage à basse température (40 à 50 ° C) a l'avantage de mieux préserver la qualité nutritionnelle du produit et donne déjà un produit généralement correct du point de vue bactériologique. Aucun microorganisme dangereux ne peut survivre longtemps dans un produit à moins de 9 % d'eau correspondant à une activité de l'eau inférieure à 0,5 (< 50 % d'humidité relative dans l'air à l'équilibre avec le produit à 25° C). La spiruline ne contient en principe pas de spores à cause du pH du milieu de culture. La qualité microbiologique s'améliore au stockage. Le stockage en sachets scellés permet une vérification a posteriori de la qualité du séchage : si le vide se forme, c'est que le produit était correct ; si le sachet se gonfle (cela peut demander quelques mois), c'est qu'il y a fernentation.

En cas de doute sur la qualité bactériologique ou le degré de séchage de la spiruline séchée, il est possible de la chauffer à 120° C dans un four ou un stérilisateur solaire. Mais la chaleur sèche ne stérilise pas bien et ne détruit pas les spores de bactéries ni les toxines éventuellement présentes. C'est pourquoi il demeure nécessaire de travailler en respectant au moins les règles d'hygiène classiques (ne pas toucher le produit avec les mains, travailler loin du sol, avec des instruments et récipients en inox ou plastique, etc.), et il est bon de faire vérifier de temps à autre la conformité du produit par rapport aux normes bactériologiques en vigueur.

10) CONSOMMATION

10.1) Alimentation humaine

La spiruline ne remplace pas les aliments caloriques tels que le manioc, le riz, le blé, la pomme de terre ou le maïs, mais c'est un ingrédient idéal de la sauce protéinée qui accompagne la "boule" africaine, par exemple, apportant non seulement ses protéines, mais de nombreux autres éléments très favorables à la bonne santé de tous et notamment des petits enfants.

Mille mélanges et recettes peuvent être inventés pour consommer la spiruline crue ou cuite, fraîche ou sèche, de manière agréable. Il n'est pas exagéré de prétendre pouvoir faire de la très bonne gastronomie à base de spiruline de qualité, surtout fraîche.

La spiruline séchée en spaghetti est généralement préférée par les consommateurs au produit industriel séché à l'atomiseur ("spray drier"), tant pour sa consistance physique que pour son odeur. La présentation sous forme de spaghetti non ou peu broyés plait généralement beaucoup, mais n'est pas pratique pour l'emballage et le stockage.

10.1.1) Biomasse fraiche

La biomasse fraîche de bonne qualité peut être directement consommée après pressage ou bien elle peut être mise en conserve (congelée, salée, sucrée ou séchée). Fraîche, elle peut se garder en récipient fermé jusqu'à 4 jours à 1° C, 2 à 3 jours à 5° C, un jour à 8° C, mais seulement si elle n'a pas été lavée (avant de consommer une spiruline conservée au réfrigérateur, vérifier son odeur). Bien que le meilleur moment pour récolter soit le matin, il est possible de retarder un peu la récolte jusqu'à un moment plus opportun pour la cuisine ou le repas si l'on n'a pas de réfrigérateur. En cours de stockage en réfrigérateur, en récipient non fermé, il arrive que des sels résiduaires migrent en surface du produit, lui conférant un goût amer: dans ce cas enlever la "croûte". Le meilleur mode de stockage en réfrigérateur est sous la forme de saucisses (sans contact avec l'air) qui évite tout risque de retombée de goutte d'eau distillée sur la biomasse. En climat tempéré, la spiruline fraîche récoltée l'hiver peut se conserver très longtemps au réfrigérateur à 5° C, 10 à 15 jours par exemple. Dans l'option congélation, veiller à ne pas congeler de trop grosses masses unitaires qu'il serait impossible de diviser lors de l'utilisation : le mieux est souvent de faire des "glaçons" très pratiques (on peut utiliser les bacs à glaçons classiques).

Les personnes qui n'aiment pas l'odeur un peu forte de la spiruline sèche (odeur rappelant le poisson séché) préfèreront la spiruline fraiche (ou congelée), qui n'a pratiquement **ni odeur ni goût** si elle est de bonne qualité et qui semble posséder un certain pouvoir exhausteur de goût, un peu comme le glutamate de sodium, et permettre donc de relever le goût de nombreux mets auxquels on l'ajoute. La spiruline fraîche de bonne qualité étant de consistance très ferme on peut faciliter son emploi en lui rajoutant peu d'eau puis de crème ou d'huile pour en faire une sauce verte de la consistance souhaitée, éventuellement assaisonnée d'ail ou d'oignon. On prépare facilement une sauce délicieuse pour

accompagner des gateaux d'apéritif en mixant spiruline fraîche + crème fraîche + un peu de fromage bleu, etc.

Photos :

- Siruline fraîche pour l'apéritif, Mialet, 1996



- Après le pressage les mamans récupèrent les restes de biomasse sur la toile pour les enfants à la Coopérative Agro-Piscicole de N'dress, Bangui (RCA), 1995 :



La spiruline fraîche et crue est environ deux fois plus plus efficace que la spiruline séchée et trois fois plus que la spiruline séchée et cuite, car plus digeste et plus riche en certains éléments actifs comme le béta-carotène, la phycocyanine, l'acide gamma-linolénique et le fer assimilable. La spiruline congelée doit être décongelée et utilisée très rapidement, sinon elle se gâtera: le mieux est de la plonger dans de l'eau bouillante pour en faire un bouillon ou une sauce "instantanés" à accommoder au choix.

L'auteur consomme depuis sept ans de la spiruline fraîche ou congelée de sa propre production, et en grande quantité, mais recommande de se méfier de celles dont on ignorerait le mode exact de production... S'il y a des risques d'infection par le choléra ou les amibes, par exemple, ne pas consommer la biomasse fraîche crue.

10.1.2) Spiruline cuite

En cas de doute sur la qualité bactériologique de la spiruline, fraîche ou sèche, il est prudent de la cuire au moins une ou deux minutes, surtout pour les personnes affaiblies ou les enfants en bas âge: on peut pour cela l'ajouter à la soupe ou à la sauce en fin de cuisson. On peut préparer un bouillon en délayant la spiruline dans l'eau bouillante, et arrêter la cuisson dès que "ça monte" (comme le lait). La phycocyanine (pigment bleu) est détruite au-dessus de 70° C en présence d'eau. L'acide gamma-linolénique n'est pas détruit lors de la cuisson (10 minutes à l'ébullition) d'une bouillie de sevrage à base de farines de céréales et de spiruline sèche, comme l'ont montré des essais faits par le Dr Dupire (1998). Il arrive que la spiruline devienne brune dans l'eau bouillante, mais ce n'est pas toujours le cas.

10.1.3) Conserves de spiruline fraiche

On peut saler à 10 % de sel la biomasse fraîchement pressée; en homogénéisant soigneusement le mélange on obtient une pâte assez fluide, prenant au bout de quelque temps une consistance de gel et une intense couleur sombre (la phycocyanine bleue apparaît avec ses reflets rouges caractéristiques), au goût rappelant la pâte d'anchois. Elle peut être gardée à 20° C plusieurs mois dans un bocal sous une couche d'huile: Nous avons vérifié une fois qu'un tel produit, conservé quatre mois à 20 ° C, était bactériologiquement correct; mais dans une autre expérience similaire il y a eu fermentation et il faut donc être prudent. Des essais devraient être entrepris sur la conservation par le vinaigre ou le miel et par lactofermentation.

10.2) Alimentation animale

La spiruline, notamment de second choix (grumeaux, balayures), peut se valoriser dans l'alimentation des animaux (poules pondeuses, poulets, vaches, chevaux de course, poissons, crustacés, larves de crevettes, etc.). Elle améliore leur santé, leur apparence, leur qualité ou leurs performances. Pour les poissons, elle peut être donnée en l'état, fraîche ou sèche ou, mieux, être incorporée aux granulés. Pour les poules, on peut ajouter jusqu'à 10 % de spiruline dans la ration.: la qualité des œufs est améliorée (jaune plus coloré).

11) HYGIENE

La production industrielle d'un produit alimentaire respectant les normes internationales nécessite le respect de règles d'hygiène draconiennes tant au niveau du matériel que du personnel et de l'emballage :

- matériel en plastique alimentaire, verre ou inox

- port de gants, masques, résilles

- filtration de l'air

- stérilisation des outils, du produit et des emballages.

De telles précautions paraîtront hors de portée des exploitations familiales ou artisanales, mais celles-ci doivent au moins s'efforcer de travailler le plus proprement possible. Le niveau d'hygiène à respecter s'apparente à celui qui est habituel au niveau de la cuisine et de la vaisselle familiale ou communautaire dans la région. Voici quelques recommandations de bon sens:

- Vérifier qu'il ne reste pas de la spiruline dans les recoins du matériel après nettoyage (par exemple sur les bords des cadres de filtration, ou dans l'extrudeuse).

- Utiliser des ustensiles de couleur blanche de préférence.

- Eviter le contact de restes de spiruline sèche avec de la biomasse fraiche.

- Eviter le contact des ustensiles avec le sol ou le ciment qui sont des nids à microbes.

- Ne jamais toucher avec les doigts nus de la spiruline sèche pour ne pas risquer de la contaminer par des staphylocoques dorés.

- Eloigner les rongeurs (il existe des appareils à ultrasons pour cela).

- Couvrir les récipients contenant de la biomasse pour éviter qu'elle se salisse.

Une spiruline artisanale peut être de très bonne qualité. Mais si elle est produite et surtout séchée et manipulée dans un environnement riche en microbes elle ne pourra être consommée que par des personnes habituées à cet environnement: pas question de la commercialiser en ville ou sur le marché international, sauf à la stériliser et/ou à l'analyser pour vérifier qu'elle est conforme aux normes en vigueur.

12) PRIX DE REVIENT

Voir le programme de calcul du prix de revient CALCUL.htm - Prixspir

13) RECOMMANDATIONS FINALES

Après son long apprentissage dans des conditions de culture de la spiruline très variées, l'auteur tient à souligner celles qu'il considère comme les plus faciles pour l'artisan, et qui se résument à ne pas chercher à faire des exploits de productivité ou de prix de revient.

Pratiquement cela veut dire :

- protégez vos bassins par une serre ombrable,

- utilisez l'air comme source de carbone principale,

- résistez à la tentation de récolter la couche flottante,

- utilisez oligo-éléments et chélatants,

- si vous devez vous absenter, ne confiez vos cultures qu'à des mains sûres.

De plus, pour les débutants qui n'ont pas encore acquis du doigté :

- choisissez un milieu de culture assez concentré (b = 0,2)

- pratiquez un taux de purge assez élevé (> 2%/jour)

- chargez peu votre séchoir (< 5 kg/m² de section)

* * *

CALCULS

*[Instructions for use of the simulation model (**English** version)*

The softwares presented here are freely available for non-commercial uses. They can be run on the simplest PC computers, but not on MacIntosh computers. Download bsi.exe on your disk, create a new file on your disk C, name it "spirul", and run meteo.exe once ; the main program spiru-e.exe can then be run (if the computer asks the question " Input path… ", answer C:/). If you ask for a printout of the results, go to the file spirul\spiru-e.doc automatically generated on your disk. To print graphs use Print Screen.

Four other softwares can be run the same way : spirpac.exe for coupling the culture with a heat pump, spiru.exe (in French) for doing parametric studies, spitfix.exe for simulating laboratory cultures at constant temperature under constant light, and prixspir.exe (French) for the calculation of spirulina cost prices.]

Introduction et Mode d'emploi

Les logiciels présentés ici sont disponibles gratuitement pour usage non commercial.

Télécharger au préalable le module bsi.exe sur le disque dur. Quand on appelle un programme de calcul en cliquant sur son lien, une boite "Téléchargement de fichier" apparaît dans laquelle il faut cocher "Enregistrer ce programme sur le disque" ou " Exécuter " ; à la question éventuelle " Input path… ", répondre : **C:/**.

Il est prévu la possibilité d'imprimer des résultats dans un fichier Word (.doc) du même nom que le programme de calcul et qui se place automatiquement dans un dossier dénommé "spirul" créé initialement sur le disque C. Ce fichier peut être imprimé par n'importe quelle imprimante. N'imprimer que les résultats intéressants (sélection ou page courante). Supprimer ce fichier d'impression après usage ou effacer son contenu, sinon il deviendrait trop gros à la longue. Une autre façon d'imprimer des résultats est la copie d'écran (à partir du presse-papier de Windows). L'impression des graphiques ne peut se faire que de cette façon-là.

Les calculs ne peuvent malheureusement s'exécuter qu'en environnement Windows ou compatible. Les utilisateurs équipés en MacIntosh auront intérêt à emprunter un PC, même d'un modèle ancien, pour pouvoir exécuter ces calculs.

Dans les premières éditions de ce Manuel plusieurs programmes de simulation de culture de spiruline étaient proposés. Actuellement spiru-f.exe regroupe les diverses possibilités antérieures tandis que spirpac.exe introduit le couplage avec une pompe à chaleur, spiru.exe

permet des études paramétriques automatiques et spitfix.exe simule une marche en laboratoire à température et éclairage fixes et sans récolte. Le programme de calcul du prix de revient prixspir.exe a été maintenu.

LE MODELE DE SIMULATION

Le logiciel peut être appelé en cliquant sur : spiru-f.exe (ou en version anglaise sur spiru-e.exe). Pour l'utiliser, il est bon de lire la notice ci-dessous, mais la majorité des informations nécessaire est donnée dans le programme.

Données de base

La virgule des décimales est toujours remplacée par un point.

Avant d'utiliser le logiciel, il faut créer un nouveau dossier sur le disque dur C et le nommer "spirul", puis exécuter une fois meteo.exe ce qui charge automatiquement 15 exemples de jeux de données dans ce dossier C:\spirul sous forme de petits fichiers Word portant le nom du site correspondant (ou de ses 6 premières lettres s'il est plus long). Ces fichiers peuvent être modifiés à volonté par l'utilisateur qui peut ainsi créer de nouveaux sites avec ses propres données. Mais attention : chaque fois qu'on exécute meteo.exe, ces fichiers de sites sont remis en leur état initial : l'utilisateur prudent devra sauvegarder sous un autre nom les fichiers des sites qu'il aura modifiés, s'il veut les conserver.

Consignes pour modifier un fichier de site :

Le fichier "c:\spirul\site" comporte 20 lignes de données séparées par des virgules, dont l'ordre doit impérativement être respecté.

Les 12 premières lignes correspondent aux 12 mois de l'année (en commençant par janvier), et chaque ligne comporte 7 moyennes mensuelles : température maxi (° C), température mini (° C), point de rosée de l'air (° C), % de nébulosité, vitesse du vent (m/s), coefficient de trouble de l'atmosphère, et pluie (mm/mois), selon les définitions et unités indiquées dans le programme (option données météo à l'écran ou imprimées).

Les 8 dernières lignes portent les 72 variables définies dans le programme, plus "nom du site". Voici la liste des N° des variables avec leur définition :

1 Ajout maxi de bicarbonate, g/jour/m²

2 Ajout maxi de CO2, g/jour/m²

3 Ajout maxi de sucre, g/jour/m²

4 Profondeur initiale de la culture, cm

5 Valeur en eau du fond et des bords, cm

6 Nombre de jours successifs de calcul (> 4 , <= 600), non compris jours intermediaires pour nettoyage et reensemencement

7 Nombre de jours sans ajout de carbone en fin de campagne

8 Nombre de jours en fin de campagne pour nettoyer et réensemencer

9 Seuil de pH déclanchant l'ajout de carbone

10 Rapport molaire CO_2/base forte dans le milieu initial

11 Capacité de récolte maxi, g/jour/m^2

12 Coeff. de modulation de la vitesse du vent(fournie par la météo (0 à 10)

13 Coeff. de modulation de l'ombrage automatique (0 à 1)

14 % d'ombrage écran thermique)nocturne

15 Temperature de bassin limite maximum, °C

16 Basicité du milieu de culture initial, gmoles de base forte/litre

17 Basicité maximum, gmoles de base forte/litre

18 Concentration minimum en sels "fixes" (chlorures, nitrates, sulfates), g/l (>= 1;peut être = 1 si b = .2 ou si salinité de l'eau d'appoint > 4)

19 Salinité totale maxi du milieu, g/litre

20 Salinité totale de l'eau d'appoint, g/litre

21 Débit d'air d'aération, Nm3/hr/m^2 de surface de culture (> 0.04, mais < 35)

22 Coefficient de modulation du débit d'aération (0 à 10)

23 Carburant : aucun (0), gaz naturel (1), propane (2), butane (3), méthanol (4), éthanol (5), biogaz(6) (spécifier la teneur en CO_2 du biogaz, variable n°24)

24 % de CO_2 dans le biogaz (en volume) ; quelconque si carburant n'est pas biogaz

25 Débit de carburant vers groupe électrogène ou brûleur, g/hr/m^2

26 % de la chaleur de combustion transformée en électricité dans le groupe électrogène (quelconque si pas de carburant)

27 % de la chaleur de combustion utilisée pour le chauffage en cas de besoin (quelconque si pas de carburant)

28 % des gaz de combustion envoyés dans la serre en cas de besoin (quelconque si pas de carburant)

29 0 = sans isolation ;1 = culture 100% isolée la nuit; 2 = isolation thermique nuit; 3 = isolation thermique nuit et jour

30 Coefficient de transfert thermique a travers l'isolation, W/m^2/°C (de 0 à 10; par exemple pour 2 cm de PS expansé = 1)(0 si pas d'isolation)

31 Seuil de temperature du bassin au dessous duquel le toit à double vitrage est mis en oeuvre (0 si pas de double vitrage)

32 Klux lampes (0 à 20);[N.B. si non nul,alors l'option isol = 1 (variable n°29)est

impossible]

33 Seuil d'allumage des lampes, Klux (entre 1 et 20), mesuré sous ombrage (0 si pas de lampes)

34 % de la puissance des lampes contribuant au chauffage (> 32 %, 0 si pas de lampes)

35 Purge éventuelle, %/jour (10 à 20 % = normal)

36 Jour initial (quantième dans le mois)

37 Mois initial (quantième dans l'annee)

38 Concentration en CO2 dans l'air externe, vpm

39 Rendement de récolte, %

40 Concentration en spiruline (juste après récolte, g/l [>0.15]

41 Heure moyenne de la récolte

42 Vitesse moyenne de circulation de la culture, cm/s (<=30)

43 Coefficient d'ajustement de la fonction photosynthèse (= 1 normalement)

44 Consommation de CO2/kg de spiruline (valeur normale = 1.8)

45 Taux d'actualisation financière, %/jour

46 Azimuth, en degrés, de la normale au plan de la culture (0 = orienté plein Sud, 90 = Est, -90 = Ouest, quelque soit l'hémisphere; quelconque si culture horizontale)

47 Inclinaison du plan de la culture par rapport à l'horizontale, degrés

48 Altitude du lieu, m

49 Latitude du lieu, degrés (> 0 dans l'hémisphere Nord)

50 Ombrage fixe (actif nuit et jour), %

51 SITE(11 caractères maxi)

52 Coefficient d'absorption du CO2 dans le milieu de culture, gmoles/m²/hr/atm

53 Concentration initiale et finale en spiruline (variable dénommée ci), g/l

60 Prix du carbonate de sodium, $/kg

61 Prix du bicarbonate de sodium, $/kg

62 Prix du sel (NaCl), $/kg

63 Prix de l'urée, $/kg

64 Prix du CO2 liquide, $/kg (quelconque si ajout = 0)

65 Prix du sucre, $/kg (quelconque si sucre ou ajout = 0)

66 Prix du sulfate de magnésium ($MgSO_4,7H_2O$), $/kg

67 Prix du sulfate dipotassique (K_2SO_4), $/kg

68 Prix du phosphate monoammonique ($NH_4H_2PO_4$), $/kg

69 Prix de l'eau, $/m3

70 Prix de l'électricité 220 V achetée ou vendue, $/kWh

71 Coût fixes (amortissements + entretien + main d'oeuvre, etc) actualisés au temps 0, $/m²/(période de marche + jours intercampagne)

72 Prix du carburant, $/kg (quelconque si la variable dénommée carbur = 0)

73 Niveau maximum permis dans le bassin en cas de pluie, cm (ne peut être < niveau initial)

74 Basicité de l'eau d'appoint (< ou = à la variable n°16), gmoles de base forte/litre

75 pH de l'eau d'appoint

76 Intensité lumineuse maximum autorisée lorsque la température du bassin est de 10°C, klux (valeur généralement admise = 30)

77 Recyclage de milieu de culture épuré, litres/jour/m²

78 pH du milieu de culture recyclé (si 0, alors le pH est automatiquement calculé en équilibre avec l'air extérieur)

79 Température à laquelle la culture est portée par la pompe à chaleur (dans le logiciel SPIRPAC) pendant le jour, °C

80 Température à laquelle la culture est portée par la pompe à chaleur (dans le logiciel SPIRPAC) pendant la nuit, °C

81 % de pluie admise dans le bassin à l'air libre

82 nombre de jours consécutifs sans récolte par semaine (0 à 3)

83 option sans appoint d'eau (0) ou avec (1) [bassins à l'air libre uniquement]

Voici l'ordre dans lequel ces variables doivent être inscrites, ligne par ligne dans le fichier "c:\spirul\site":

1-2-3-4-5-6-7-8-9-10

11-12-13-14-15-16-17-18-19-20

21-22-23-24-25-26-27-28-29-30

31-32-33-34-35-36-37-38-39-40

41-42-43-44-45-46-47-48-49-50

51(SITE)-52-53-60

61-62-63-64-65-66-67-68-69-70

71-72-73-74-75-76-77-78-79-80

81-82

83

Utilisation

Un intérêt du logiciel est de pouvoir optimiser rapidement la marche d'une culture de spiruline fonctionnant sur un site donné, dans des conditions climatiques données.

Il peut servir aussi comme aide à la conception d'un projet correspondant à un objectif donné, ou comme didacticiel.

Application

Le modèle s'applique au cas d'un bassin à l'air libre ou fermé par une couverture translucide, avec ventilation contrôlée. Un mode de réalisation particulier de ce dernier cas est de tendre un film de serre par dessus les bords du bassin (cf J.P. Jourdan (1993) BIBLIOGRAPHIE.htm - Monaco, page 191); un autre est constitué par le "bassin respirant" à aération naturelle par cheminée (cf Fox

,1996 BIBLIOGRAPHIE.htm - Fox); une gaine en film de serre, placée horizontalement et remplie partiellement de milieu de culture constitue aussi un mode de réalisation possible ("photobioréacteur"). Pour que la simulation s'applique il faut et il suffit que la surface de la culture en contact avec l'atmosphère soit égale à la surface éclairée. Le mode d'introduction de l'air est quelconque. Il n'y a pas de limitation à l'inclinaison et à l'orientation de la surface active de la culture (le milieu de culture peut ainsi être en écoulement sur un plan incliné comme dans les photobioréacteurs de type Setlik). La latitude du site d'installation doit être comprise entre les cercles polaires. Pour les climats froids, un chauffage et/ou un double vitrage et/ou un écran thermique nocturne facultatifs ont été prévus ; le chauffage est par combustion de carburant propre et dans ce cas il est prévu en option la co-génération d'électricité et le CO_2 de combustion peut servir à alimenter la culture. Une autre option facultative est l'isolation de la culture, avec plusieurs modes : soit isolation complète (adiabatique) sans aération ni chauffage la nuit, soit permettant l'aération et le chauffage la nuit seulement ou jour et nuit. On a ajouté une option (un peu théorique car bien inadaptée aux productions artisanales !) permettant un éclairage électrique sur les bassins pendant 16 hr/jour. Une dernière option permet de recycler du milieu de culture après épuration (et changement du pH).

Principes du calcul

Le programme simule le fonctionnement du bassin depuis son ensemencement jusqu'à son arrêt au bout d'un nombre de jours fixé (pouvant atteindre 18 mois). A partir d'un milieu de culture à pH donné ensemencé au temps zéro, on calcule la croissance des spirulines heure par heure ; un bilan thermique et un bilan carbone (absorption de CO_2 de l'air + injection - consommation) permettent de calculer, également heure par heure, la température et le pH, qui eux-mêmes déterminent la vitesse de croissance.

La récolte a lieu chaque jour (à une heure au choix), sauf les jours sans récolte, et elle ramène la concentration en spiruline à une valeur au choix, sauf que la capacité de récolte journalière ne peut

dépasser une limite à fixer. Mais il n'y a pas de récolte si le pH est inférieur à un seuil, ou si on l'impose pour un période donnée, ni pendant les weeek-ends (0 à 3 jours d'arrêt consécutifs par semaine). En fin de campagne on fait une récolte totale (jusqu'à la concentration d'ensemencement), et un certain nombre de jours sont consacrés aux opérations d'inter-campagnes. La productivité moyenne et le prix de revient prennent en compte ces jours d'inter-campagne.

La température sèche de l'air ambiant et le rayonnement absorbé par la culture sont calculés heure par heure à partir des données météo chargées (valeurs moyennes mensuelles). La température de rosée de l'air et la vitesse du vent sont supposées constantes en cours de journée. Le pourcentage de nébulosité est concentré sur des jours "gris" répartis uniformément sur trois périodes de dix jours à l'intérieur de chaque mois, sans correction pour la température de l'air ambiant ces jours-là. Un % (au choix) de la pluie pénètre dans le bassin à l'air libre.

Une purge (de filtrat) est pratiquée pour maintenir le niveau en cas de pluie excessive, ou pour maintenir la basicité et, si possible, la salinité en dessous du maximum fixé. Les sels et éventuellement l'eau voulus sont ajoutés pour maintenir la qualité du milieu de culture.

De l'eau est aussi ajoutée pour compenser l'évaporation et maintenir le niveau entre le niveau normal (initial) et un minimum (1 cm en dessous). Mais dans le cas des bassins à l'air libre une option permet de supprimer cet appoint, ce qui permet de simuler le cas des lacs naturels ne recevant pas d'autre eau que la pluie, ou le cas de pénurie d'eau.

Indépendamment de la purge il est prévu de pouvoir envoyer du filtrat vers un système d'épuration éliminant les matières organiques et modifiant le pH. Un même volume est recyclé simultanément au bassin ; il est admis que ce recyclage ne change ni la basicité ni la salinité "fixe" (sels non carbonatés) du milieu, ni le niveau de liquide dans le bassin, ni la température.

Une option permet de décider si les purges, l'appoint d'eau et le recyclage sont possibles ou non les jours sans récolte ; s'ils sont possibles ces jours-là, le volume de milieu à purger ou épurer est filtré, et la biomasse récupérée est remise dans le bassin.

La nuit, la culture peut être complètement isolée (à la fois thermiquement et de l'atmosphère, avec chauffage coupé) ou partiellement (seuls les échanges convectifs et radiatifs pouvant être supprimés ou réduits, avec aération et chauffage maintenus). La culture peut être ombrée et/ou chauffée et/ou isolée thermiquement. En cas d'isolation nocturne complète, l'option éclairage artificiel est impossible et une aération minime est maintenue pour permettre la respiration (réduite à 20 % de la normale) de la culture mais elle est négligée du point de vue effet thermique et évaporation. Le degré d'isolation thermique partiel de la serre est réglable. Les options double vitrage, isolation thermique et ombrage sont compatibles..

L'ombrage est supposé arrêter les échanges thermiques radiatifs mais non convectifs. Deux types d'ombrage de jour sont prévus, et se cumulent ; l'ombrage dit "automatique", modulable, est automatiquement installé si les conditions de température et de lumière le demandent; l'ombrage dit "fixe" est permanent nuit et jour. Un écran thermique (ou "ombrage nocturne") peut être installé la nuit pour réduire le refroidissement nocturne ; il se cumule avec l'ombrage fixe éventuel, mais il est sans effet avec l'option isolation.

L'aération de la serre comporte un élément fixe (au choix mais > 0,1 Nm3/hr/m²) et un élément "automatique" modulable mis en œuvre selon la température du bassin.

Le chauffage de la serre se fait par combustion d'un choix de combustibles propres (dont biogaz à % de CO_2 variable), pouvant dervir simultanément d'apport de CO_2 par injection de tout ou partie des gaz de combustion dans la serre. Mais il est aussi possible de n'utiliser qu'une fraction (pouvant être nulle) de la chaleur de combustion, combustion qui ne sert, à la limite, qu'à apporter du CO_2.

L'option éclairage artificiel majore l'éclairement des bassins sous serre quand l'éclairement naturel (mesuré sous ombrage éventuel) est inférieur à un seuil et ceci pendant 16 heures/jour. La consommation électrique des lampes est de 13 Watt/klux/m² . Dans l'option isolation complète (variable n° 29 = 3), les lampes ne sont allumées que de nuit (électricité moins chère). La portion de la chaleur dégagée par les lampes admise dans la serre pour contribuer au chauffage est réglable de 32 à 100 %.

Dans le cas des bassins à l'air libre ces options ne sont évidemment pas toutes disponibles : l'ombrage fixe et l'écran thermique nocturne sont possibles..

La vitesse de photosynthèse peut varier selon les souches utilisées ou les circonstances (mortalité, prédateurs) ; elle est donc ajustable au moyen d'un coefficient (la variable n° 43).

Le programme de calcul ne tient pas compte de la disparition de spirulines par mortalité ou du fait de prédateurs (on admet pour ces deux cas qu'il y a recyclage du carbone à l'intérieur

de la culture).

Pour tenir compte de la production des exopolysaccharides non inclus dans la récolte, pouvant varier selon les souches ou les conditions, et pour tenir compte aussi des variations possibles de composition de la spiruline suivant les souches, la consommation de CO2 par kg de spiruline n'est pas considérée comme fixe mais comme une variable ajustable (n° 44).

On doit aussi fixer le rendement de récolte (variable n° 39), qui tient compte de la perte de spiruline entre la filtration et le stockage du produit fini.

Le programme néglige :

- l'influence de la vitesse de circulation de l'air interne sur l'évaporation,

- l'effet de l'ombrage du aux bords du bassin par soleil non vertical,

- les variations de teneur en oxygène dans l'atmosphère interne,

- l'acidification ou l'alcalinisation éventuelles du milieu sous l'effet des nutriments (nitrates et urée),

- la dureté éventuelle de l'eau d'appoint.

Salinité, alcalinité et pH de l'eau d'appoint sont pris en compte, ce qui autorise l'utilisation d'eau saumâtre et/ou alcaline. On admet que l'eau apporte le calcium nécessaire.

L'alimentation en carbone, commandée par la régulation de pH, peut se faire soit par ajout direct dans le milieu de culture de bicarbonate ou de sucre ou de gaz CO2 pur, soit par enrichissement en CO2 de l'air de la serre par une fraction des gaz de combustion; un bilan-matières sur le CO2 entre l'entrée de l'air dans la serre et sa sortie permet de calculer la teneur en CO2 de cet air (supposé homogène). Le calcul tient compte du CO2 apporté par l'urée et par l'air frais d'aération. Rien n'empêche de panacher les diverses sources de carbone.

La photoinhibition de la photosynthèse à basse température est prise en compte par l'interdiction d'opérer à température inférieure à 10° C quand l'éclairement dépasse l'intensité limite choisie (variable n° 76), 30 Klux par exemple ; la photosynthèse est supposée s'annuler à température inférieure à 10° C.

Résumé des règles de régulation thermique adoptées en serres :

- Nuit et jour :

  - Double vitrage mis en œuvre si température du bassin < tempéraure de consigne (variable n° 31)

  - Combustible = débit normal (variable n° 25) si bassin < 25° C

  - Chaleur de combustion utilisée (% = variable n° 27) si bassin < 27° C, sinon = 0

  - Aération = débit normal (variable n° 21) si bassin < 30° C

  débit normal (variable n° 21) + 50 x coefficient (variable n° 22) si bassin entre 30 et 35° C

  débit normal + 75 x coeff. si entre 35 et 38° C

  débit normal + 100 x coeff. si > 38° C

  - Ombrage fixe = invariable

- Nuit :

  - Ombrage (écran thermique) nocturne = variable n° 14

- Jour :

  - Ombrage automatique =

  0 si bassin < 30° C

  50 % x coefficient (variable n° 13) si bassin entre 30 et 35° C

  75 % x coefficient si > 35° C, ou si < 15° C lorsque la lumière dépasse la valeur (variable n° 76) de l'éclairement maximum autorisée.

  - Double vitrage mis en œuvre si le bassin est à plus de 35° C et si, simultanément, la température extérieure dépasse celle du bassin

Résumé des règles de régulation thermique adoptées sans serre :

- Nuit et jour :

  - Ombrage fixe = variable n° 50

- Nuit :

  - Ombrage (écran thermique) nocturne = variable n° 14

- Jour :

- Ombrage automatique =

0 si bassin < 30° C

50 % x coefficient (variable n° 13) si bassin entre 30 et 35° C

75 x coefficient si > 35° C

N.B. Pour un bassin sans aucun dispositif d'ombrage, les variables n° 13,14 et 50 doivent être fixées à une valeur nulle.

Absorption de CO2 atmosphérique

La vitesse d'absorption est proportionnelle au coefficient d'absorption et à la différence des pressions de vapeur de CO2 dans l'air et sur le liquide. La pression de vapeur du CO2 sur une solution de carbonate/bicarbonate de sodium est donnée dans la littérature. Kohl et Riesenfield (1960) donnent dans "Gas Purification" BIBLIOGRAPHIE.htm - kohl, à la page 117, une formule ayant comme variables la température, la basicité et le rapport c (moles de CO2/mole de base), en mmHg:

$pCO2 = 68,5 \times b^{1,29} \times (2c - 1)^2 / [(1 - c) \times (333 - 1,8 \times t) \times (0,0487 - 0,0006 \times t)]$

où

b = basicité du milieu absorbant, gmoles de base forte/litre

c = rapport molaire CO2/base correspondant au pH du milieu

t = température du milieu,° C

Le programme utilise cette formule.

L'absorption du CO2, exprimé en g de spiruline/jour/m² (en admettant 1,8 kg de CO2 par kg de spiruline) est alors égale à 0,772 x ka x [0,00076 x vpm x (1 - alt/10000) - pCO2]

où

ka = coefficient d'absorption,

gmoles de CO2 absorbés/heure/m² /atmosphère

vpm = teneur de l'air en CO2, ppm volumiques

alt = altitude, mètres

0,772 = (44 x 24)/(1,8 x 760)

Le coefficient d'absorption du CO2 à travers la surface du bassin est réglable (variable n° 52), mais généralement il est pris égal à la valeur expérimentale de 20 gmoles/heure/m² /atmosphère.

Respiration

La spiruline ne respire qu'en l'absence de lumière. De jour nous admettons qu'elle ne voit la lumière que dans la couche superficielle de hauteur égale au "Secchi" (cf Annexe A2: nous avons adopté la courbe correspondant à la souche dite "spiralée", avec turbidité de 12 cm) et qu'il n'y a pas respiration dans cette couche, mais qu'au-dessous il y a respiration ; ceci suppose que le milieu est agité (homogène). On admet que la respiration est réduite à 20 % de sa valeur normale en cas d'isolation complète nocturne (conformément à plusieurs expériences allant dans ce sens).

Pour quantifier la respiration normale nous utilisons les résultats de J.F.Cornet, BIBLIOGRAPHIE.htm - Cornet p. 115) pour la variation avec la température, mais pour la valeur de base à 20° C nous prenons une moyenne entre les indications de Cornet et celles de L. Tomaselli et al. (1987) BIBLIOGRAPHIE.htm - Tomaselli. Ceci est bien sûr une approximation car la respiration dépend aussi de la teneur en hydrates de carbone dans la spiruline. Ces hypothèses servent de base pour la simulation ; voici quelques valeurs qui en découlent :

DIMINUTION DU STOCK DE SPIRULINE (en % / jour) PAR RESPIRATION DANS L'OBSCURITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA CULTURE

10° C = 0,6 %/jour

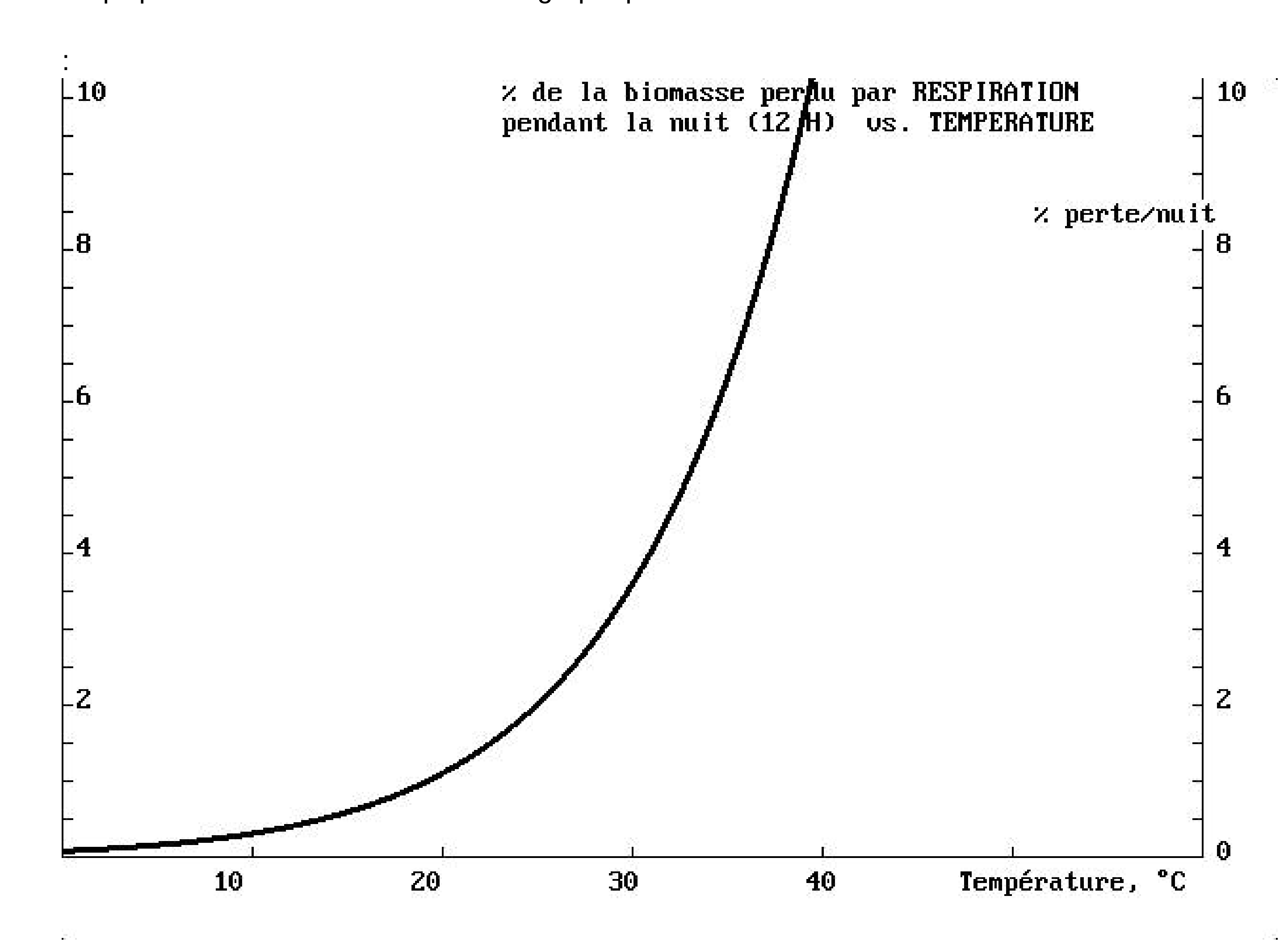
20° C = 2,3 %/jour

30° C = 7,0 %/jour

40° C = 22 %/jour

et qui peuvent se traduire sous forme graphique :

:



Respiration en fonction de la température

Croissance par photosynthèse

a) Concentrations en biomasse supérieures à 0,1 g/l (cas général)

Nous admettons que la croissance de la spiruline par photosynthèse est le produit d'un coefficient d'ajustement et de 5 facteurs supposés indépendants et détaillés en Annexe A1(A.htm - A1),

- facteur fonction de la salinité

- facteur fonction de la température

- facteur fonction du pH

- facteur fonction de l'éclairement

- facteur fonction de la vitesse de circulation du milieu de culture

Ce postulat, qui est au cœur du programme, n'est pas très étayé scientifiquement. La comparaison des figures 4 et 19 de la thèse de Zarrouk autorise à admettre que la fonction de la température est indépendante de l'éclairement ; les mesures de productivités sur nos bassins montrent que l'influence du pH, de la température et de la lumière sont en assez bon accord avec les hypothèses contenues dans ce postulat.

Par ailleurs ce postulat implique que la vitesse de photosynthèse ne dépend ni de la hauteur de liquide, ni de la concentration en spiruline, ni de la concentration en nutriments minéraux (autres que le bicarbonate), donc que la photosynthèse est proportionnelle à la surface éclairée. Autrement dit, nous faisons les hypothèses, largement vérifiées dans la pratique aux concentrations considérées, que la croissance est dans la phase linéaire, non limitée par les nutriments minéraux, avec absorption totale de la lumière pénétrant dans le bassin. A noter que la quantité de spiruline par m² (hauteur de liquide x concentration) a cependant une influence sur la productivité par le biais de la respiration (cf § précédent).

Nous admettons aussi que la croissance de la spiruline est uniquement autotrophe. Si une croissance mixotrophe, ou même éventuellement hétérotrophe, se produit, elle sera fortement concurrencée par les organismes hétérotrophes cohabitant avec la spiruline dans le milieu (bactéries, zooplancton). L'erreur commise sur la croissance ne peut de toutes façons être que par défaut. Nous admettons donc qu'en cas d'apport de carbone par le sucre, celui-ci est oxydé en CO_2 par un mécanisme quelconque.

b) Pour des concentrations en biomasse inférieures à 0,1 g/l la croissance est exponentielle, ce que le modèle traduit en multipliant la vitesse calculée en a) par dix fois la concentration (en g/l).

<u>Remarque sur la répartition spectrale de l'énergie lumineuse utilisée et le rendement des lampes</u> :

La spiruline étant capable d'utiliser un spectre très large grâce à sa richesse en divers pigments photosynthétiques, les différences de répartition spectrale entre lumières solaires sous différents angles, latitudes et altitude et lumières artificielles sont négligées. Les "klux" (de lumière visible, tels que mesurés au luxmètre) sont supposés avoir l'équivalence suivante avec la puissance totale dissipée :

10 Watt/m² /klux pour le soleil

13 Watt/m² /klux pour les lampes modernes (type iodure ou sodium).

Données de températures et rayonnement solaire

On admet que la température ambiante varie linéairement entre son minimum au lever du soleil et son maximum à 14 heures solaires. On calcule le rayonnement solaire absorbé par la culture comme on le fait pour un capteur solaire avec ou sans vitrage, à partir des équations astronomiques et thermiques classiques rappelées par exemple dans Chouard, Michel et Simon (1977) BIBLIOGRAPHIE.htm - Chouard.

Bilan thermique

La température de la culture est calculée par bilan thermique entre les apports de chaleur (dont rayonnement solaire et chaleur de combustion) et les diverses pertes thermiques (on néglige les pertes vers le sol et les côtés du réacteur, mais on prend en compte une "valeur en eau équivalente" du fond et des côtés (variable n° 5) en l'ajoutant à la hauteur de liquide.

On admet que la culture et l'air interne de la serre sont homogènes en température et à la même température, et que l'inertie thermique de l'air est négligeable, mais on tient compte de la capacité thermique du flux d'air traversant la serre qui extrait de la chaleur par chaleur sensible et en se saturant d'eau. Les ajouts (eau, nutriments) sont supposés faits à la température de la culture. On tient évidemment compte des apports de chaleur par le chauffage et les lampes.

On admet que l'ombrage réduit d'un même pourcentage le rayonnement solaire incident et les pertes thermiques par rayonnement, sans affecter les échanges thermiques par convexion.

On tient compte aussi de l'énergie solaire consommée par la photosynthèse en prenant comme valeur calorifique de la spiruline 20,9 kJ/g (thèse de J.F. Cornet (1989), BIBLIOGRAPHIE.htm - Cornet page 263). Les pertes thermiques par convexion vers l'atmosphère et par rayonnement vers le ciel sont calculées comme pour un capteur solaire selon les équations classiques, par exemple celles rappelées par R. Gilles (1976) BIBLIOGRAPHIE.htm - Gilles et Chouard, Michel et Simon (1977) BIBLIOGRAPHIE.htm - Chouard. On néglige l'influence de l'inclinaison éventuelle comme il est justifié d'après P.I. Cooper (1981) BIBLIOGRAPHIE.htm - Cooper.

Consommation/Production d'électricité

Pour le calcul de la consommation d'électricité pour l'agitation (ou le pompage en cas de culture sur plan incliné), une équation très simple et plus ou moins arbitraire a été adoptée.

En cas d'utilisation de combustible, on peut en option produire de l'électricité par un groupe électrogène ("supercogénération" de chaleur, d'électricité **et** de CO_2), permettant d'implanter l'installation même sur site non raccordé au réseau électrique; un excédent d'électricité est généralement disponible pour la vente ou d'autres usages. Le groupe pourra dans un futur que nous espérons proche être une pile à combustible. En attendant, dès maintenant d'excellentes turbines à gaz miniaturisées sont disponibles.

La puissance électrique pour l'aération a été négligée (aération naturelle probablement suffisante), mais celle consommée par les lampes éventuelles, très importante, est évidemment prise en compte.

L'électricité est supposée achetée et vendue au même prix.

Calcul du prix de revient

Le modèle comporte un volet économique, permettant de calculer un prix de revient, en tenant compte d'un système de coûts fournis par l'utilisateur et actualisés au temps 0.

Le calcul du prix de revient est basé sur les consommations spécifiques correspondant aux formules suivantes :

- formule de milieu de culture sans nitrate contenant, en plus du sel et du carbonate et/ou du bicarbonate, par litre de milieu : 1 g de K_2SO_4 + 0,02 g d'urée + 0,08 g de NH_4HPO_4 + 0,16 g de sulfate de Mg + 0,001 g de Fer

- formule de nourriture comprenant, en g/kg de spiruline : 300 g d'urée + 50 NH_4HPO_4 + 40 K_2SO_4 + 30 sulfate de Mg + 0,5 Fer

- coût du fer (et des oligoéléments) négligé.

Le calcul impute les frais fixes au prorata des jours d'utilisation (nombre de jours de marche + jours "intercampagne"). Si l'installation n'est pas utilisée toute l'année, il faut en tenir compte correctement, par exemple en incluant l'arrêt annuel dans les jours "intercampagne" (variable n° 8).

Recherche d'une solution optimale

La recherche d'une solution optimale peut être facilitée par l'utilisation du programme spiru.exe, mais pour certains paramètres seulement ; sinon on opère par modification manuelle des données pour rechercher par approximations successives l'optimum. L'opérateur acquière ainsi un sens personnel plus approfondi de l'influence des différents facteurs.

Présentation des résultats

En cours de calcul un graphique apparaît sur l'écran, donnant la récolte quotidienne en fonction des jours. Ce graphique peut être copié et imprimé en passant par la copie d'écran et le presse-papier. Un retour de chariot permet de continuer le programme après utilisation du graphique.

En cours de campagne, entre deux jours choisis à l'avance, il est possible d'interrompre le tracé de ce graphique pour prendre connaissance des résultats quotidiens : ceci permet de suivre l'évolution au jour le jour, soit en marche normale (avec récolte et apport de carbone) soit sans récolte ni apport de carbone (période de congés par exemple).

On peut aussi consulter les résultats journaliers édités sous forme d'un tableau donnant les valeurs des variables suivantes : températures maxi et mini du bassin, pH, concentration en spiruline (g/l), ajout de bicarbonate et de CO_2 (g/m²), absorption de CO_2 par le bassin (g/m²), niveau (cm), production de spiruline (g/m²).

Les résultats complets sont édités en fin de programme et peuvent être imprimés en même temps que les données correspondantes.

CULTURE DE SPIRULINE AVEC RECHAUFFAGE MATINAL ET REFROIDISSEMENT NOCTURNE PAR POMPE A

CHALEUR

Une variante du logiciel précédent, dénommée spirpac.exe, comporte une pompe à chaleur fonctionnant à faible différence de trempérature et permettant de réchauffer la culture dès le lever du soleil à une température choisie (par exemple 25° C), et de la refroidir à une température choisie (par exemple 15° C) le soir. Ce système n'est pas rentable mais le logiciel permet de calculer le gain de productivité que l'on peut en attendre, et qui est en fait assez faible (de 0 à 30 % en général).

Dans cette variante le recyclage de milieu de culture n'est pas prévu.

CULTURE DE SPIRULINE A TEMPERATURE FIXE ET SOUS ECLAIRAGE FIXE

Une autre variante, dénommée spitfix.exe, simule une culture à température fixe 24 hr/24 et sous éclairage fixe 12 hr/24, sans récolte. Elle est utile notamment pour analyser les résultats d'essais de laboratoire, et vérifier la validité du modèle.

CALCUL DE PRIX DE REVIENT DE LA SPIRULINE

Le programme de calcul décrit ici peut être appelé en cliquant sur : prixspir.exe. Pour l'utiliser, lire la notice ci-dessous.

Description

Le calcul de l'investissement peut se faire soit à partir de coûts globaux précalculés, soit à partir de prix élémentaires. Dans le premier cas il faut fixer à une valeur non nulle les variables n° 61 (investissement global pour la spiruline fraîche, $/m² de bassin) et 62 (investissement global pour le séchage et le conditionnement, $/kg de capacité annuelle) ; la variable n° 30 (prix du film de serre) doit aussi être spécifiée pour les bassins (nulle si bassins ouverts). Dans le second cas, il faut fixer les variables n° 1-9, 22-27, 32-33 et 45-46.

Le type de bassin utilisé dans le calcuil détaillé de l'investissement est : sous serre à armature bois, à aération naturelle, bassin construit en film plastique avec sous-couche éventuelle de protection géotextile, posé sur sable et cendre, bords en parpaings non cimentés ou en planches fixées à des piquets acier, film fixé par liteaux et vis sur les bords. On admet que les films sont apportés sous forme de rouleaux d'une pièce pesant moins de 300 kg (pour être transportables), ce qui limite automatiquement la surface utile par bassin. La largeur des bassins est limitée à 5 m. La durée de vie admise pour le film de serre est de 2,5 années (conditions africaines). Le prix du "tissu de filtration" est supposé inclure les autres éléments du filtre (cadre, grille-support et tamis), ce qui ajoute environ 30 $/m² au prix du tissu lui-même.

Lors du démarrage on ensemence à 0,15 g/l avec de la spiruline vivante achetée.

Le programme propose 5 options pour la source de carbone (air, CO_2, gaz, bicarbonate, sucre) et le choix entre agitation électrique ou manuelle. La consommation de bicarbonate à prendre en compte (variable n° 64) s'entend hors milieu initial, mais purges comprises. Les sources de carbone sont panachables.

Le séchage est prévu avec chauffage solaire ou à gaz ou électrique (avec variante deshydrateur). Dans le cas où il n'y a pas d'électricité le séchoir est à tirage naturel. Si du gaz est utilisé pour le séchoir, le CO_2 produit est utilisé pour alimenter les bassins si l'option gaz a été choisie pour la source de carbone (correction automatique de la consommation de gaz).

La productivité (moyenne annuelle) admise comme base du calcul doit être compatible avec la source de carbone, la purge et les consommations indiquées pour la source de carbone.

Le programme donne le choix entre résultats à l'écran ou sur imprimante. Il calcule deux prix de revient : spiruline fraîche et sèche.

La main d'oeuvre est supposée proportionnelle à la production parce qu'il ne s'agit que d'installations artisanales, peu ou pas mécanisées : dans ce cas, d'après notre expérience personnelle, il faut 1,5 heures/kg de spiruline au stade "fraîche", plus autant pour séchage. Cependant, pour les niveaux de production inférieurs à 1,2 kg/jour, le programme majore linéairement la main d'œuvre du stade "fraîche" pour tenir compte du petit nombre des postes de filtration travaillant simultanément, avec un maximum de 3 heures/kg. Pour de grosses productions mécanisées, la main d'ouvre peut évidemment être bien plus faible, mais ceci est hors du cadre de ce calcul.

En cas d'utilisation de l'électricité on doit spécifier un prix du kWh non nul et une consommation (kWh/kg de spiruline) non nulle pour l'agitation et éventuellement l'éclairage des bassins (16 Wh/jour/m² est normal pour l'agitation). Le programme calcule la consommation du séchage en fonction de l'option séchage choisie (il admet 2 kWh/kg pour la ventilation seule ; 2,5 kg de propane pour le chauffage au gaz ; 30 kWh pour le chauffage électrique ; 8 kWh pour le séchage par deshydrateur).

Les prix sont exprimés en "$". Dans les exemples ci-après ce sigle représente des U.S. $, mais n'importe quelle monnaie peut être utilisée, notamment l'euro qui diffère peu du $.

On utilise les formules de milieu de culture et de nourriture suivantes avec basicité du milieu b = 0,1 et en négligeant le coût de l'apport de fer et des oligoéléments (< 0,1 $/kg, même en utilisant du fer chélaté comme le Ferfol) :

- une formule de milieu de culture sans nitrate contenant, en plus du sel et du carbonate et/ou du bicarbonate, par litre de milieu : 1 g de K_2SO_4 + 0,02 g d'urée + 0,08 g de NH_4HPO_4 + 0,16 g de sulfate de Mg + 0,001 g de Fer

- une formule de nourriture comprenant, en g/kg de spiruline : 300 g d'urée + 50 NH_4HPO_4 + 40 K_2SO_4 + 30 sulfate de Mg + 0,5 Fer

La consommation de CO_2 liquide est basée sur un rendement d'absorption de 95 %.

Si la salinité apportée par l'eau d'appoint dépasse une certaine limite, on admet qu'il est inutile d'ajouter sulfate de soude et sulfate de magnésium (par exemple si eau d'appoint = eau de mer, même diluée).

On commettrait une erreur en essayant d'utiliser ce programe pour évaluer le prix de revient de la spiruline produite dans des usines à vocation commerciale à grande échelle, mais il ne faut pas en conclure a priori

que la spiruline fabriquée artisanalement soit obligatoirement non compétitive. L'influence du prix attribué à la main-d'œuvre est déterminante. D'autre part les petits producteurs sont en général à même de valoriser leur production aux prix de détail et sans frais de marketing.

EXEMPLES DE CALCUL DE PRIX DE REVIENT DE LA SPIRULINE

Les paramètres sont ceux du cas N° 1 proposé comme exemple dans le programme, avec comme variables les dimensions et le nombre de bassins installés par site de production ; résumé des résultats :

2 bassins de 12,5 m² (largeur 2 m) = 28,2 $ / kg

2 bassins de 25 m² (largeur 2 m) = 24,3 $ / kg

2 bassins de 50 m² (largeur 3 m) = 21,9 $ / kg

2 bassins de 75 m² (largeur 4 m) = 18,8 $ / kg

2 bassins de 100 m² (largeur 4 m) = 19,0 $ / kg

3 bassins de 100 m² (largeur 5 m) = 18,6 $ / kg

5 bassins de 120 m² (largeur 5 m) = 18,2 $ / kg

INVESTISSEMENT SPECIFIQUE CALCULE PAR PROGRAMME "PRIXSPIR"

Mêmes caractéristiques et nombre de bassins qu'au paragraphe précédent, dans le même ordre :

52,6 $/m² ou 20,6 $ par kg/an de capacité de production

45,3 $/m² ou 17,7 $ par kg/an de capacité de production

41,6 $/m² ou 116,3 $ par kg/an de capacité de production

33,5 $/m² ou 113,1 par kg/an de capacité de production

33,0 $/m² ou 12,9 par kg/an de capacité de production

31,3 $/m² ou 12,2 $ par kg/an de capacité de production

30,9 $/m² ou 12,1 $ par kg/an de capacité de production

INVESTISSEMENT SPECIFIQUE MINIMUM CALCULE PAR PROGRAMME "PRIXSPIR"

Remarque préliminaire :

Quand on cite un chiffre d'investissement spécifique, il est nécessaire de bien préciser plusieurs points, faute de quoi le chiffre n'a pas beaucoup de signification :

- productivité maximale journalière ou moyennée sur l'année ?

- durée de vie ?

- terrain, bâtiments, laboratoire et son équipement, cloture compris ?

- fractionnement (nombre de bassins ou unités de production) ?

- bassins à l'air libre ou sous serre ?

- pays, climat ?

- consommation de produits chimiques et d'utilités (eau, électricité) ?

- première charge et semence comprises ?

- traitement des effluents inclus ?

- degré de mécanisation ?

- état du produit fini (frais, séché, emballé) ?

- droits de douane, taxes incluses ?

- installation du matériel compris ?

Le programme PRIXSPIR, quant à lui, prévoit des bassins sous serre, avec première charge, séchage, broyage, emballage, installation, droits et taxes compris, mais sans : bâtiments, laboratoire, clôture, traitement des effluents, ni mécanisation (à part l'agitation et le pompage si l'électricité est disponible). Les exemples donnés ci-dessus prévoient l'installation en Afrique, avec un film plastique épais garanti 10 ans, sous serre.

Dans le cas N° 0 proposé dans le programme, on utilise un film de serre de 200 µ posé sur feutre géotextile, sous serre. L'investissement spécifique pour la production de spiruline sèche, avec utilisation de CO_2 et productivité moyenne de 8 g/j/m², ressort dans ce cas à **7,2 $ par kg/an (20,9 $/m²)**, pour bassiins de 100 m², coût de la première charge et installation compris.

Rappelons que les prix utilisés incluent les taxes (TVA), ce qui donne une certaine marge de sécurité en cas d'exploitation commerciale.

****

ANNEXES

SOMMAIRE

A1) Influence de la température, de la lumière,

de l'alcalinité, de la salinité et du pH sur la photosynthèse de la spiruline

On peut admettre que la vitesse maximum de photosynthèse, dans un bassin bien agité, et dans les meilleures conditions de température, lumière, alcalinité, salinité et pH, est voisine de 1,8 g/heure/m² de bassin.

Cette vitesse peut d'ailleurs varier en fonction de la souche de spiruline et de la présence de catalyseurs.

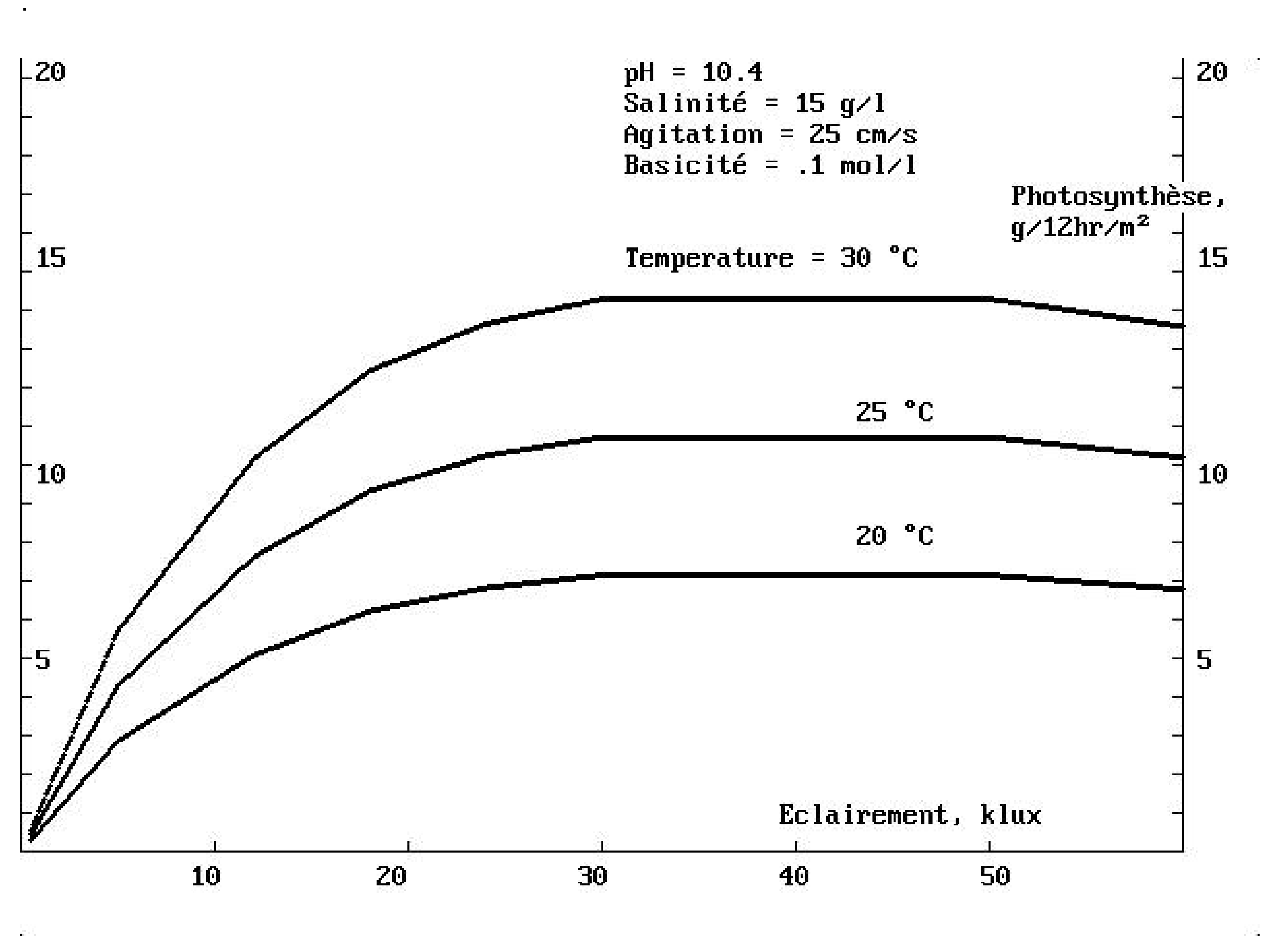
Dans les programmes de simulation donnés dans Calcul.htm, on fait l'hypothèse que la fonction photosynthèse est directement proportionnelle à des fonctions de la température, de l'éclairement, de la salinité, du pH et de l'agitation :

Vitesse de photosynthèse = k x f(T) x f(klux) x f(salinité) x f(pH) x f(agitation)

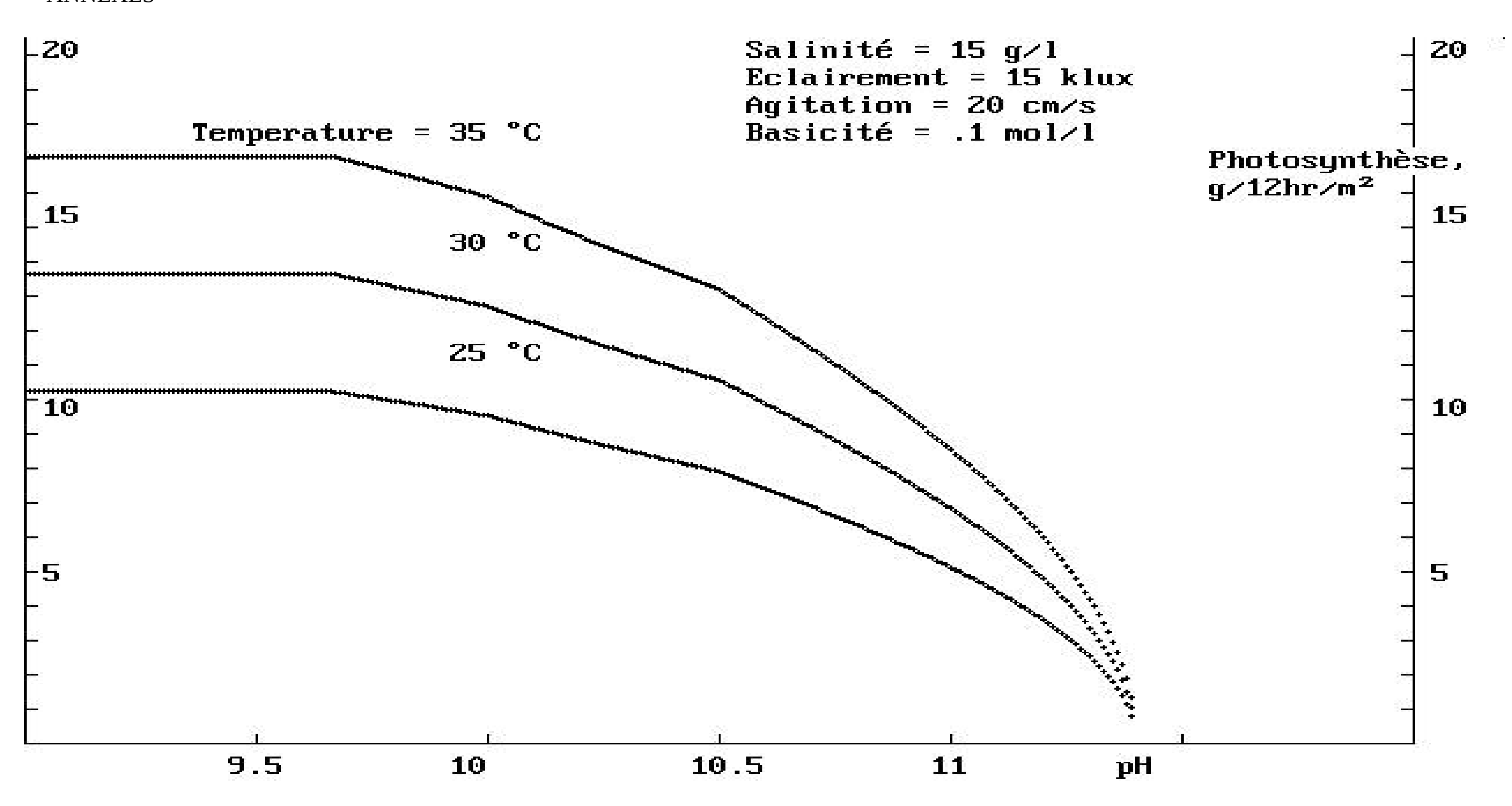
Cette hypothèse n'a pas de base scientifique, mais elle facilite les calculs et elle ne donne pas de si mauvais résultats.

Voici quelques exemples de ces fonctions, qui sont largement inspirées de la thèse de Zarrouk (en tenant aussi compte de résultats expérimentaux) :

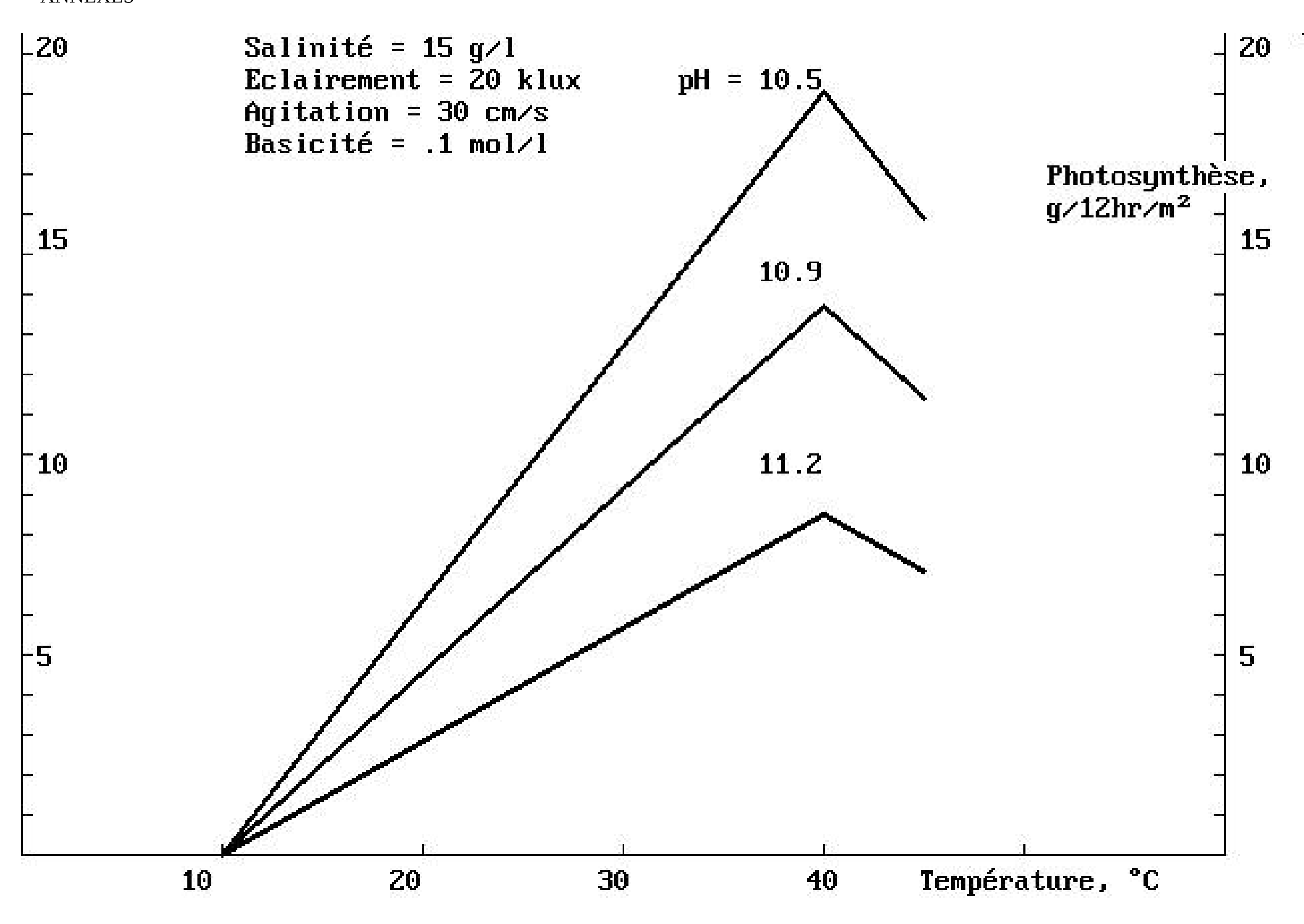
:



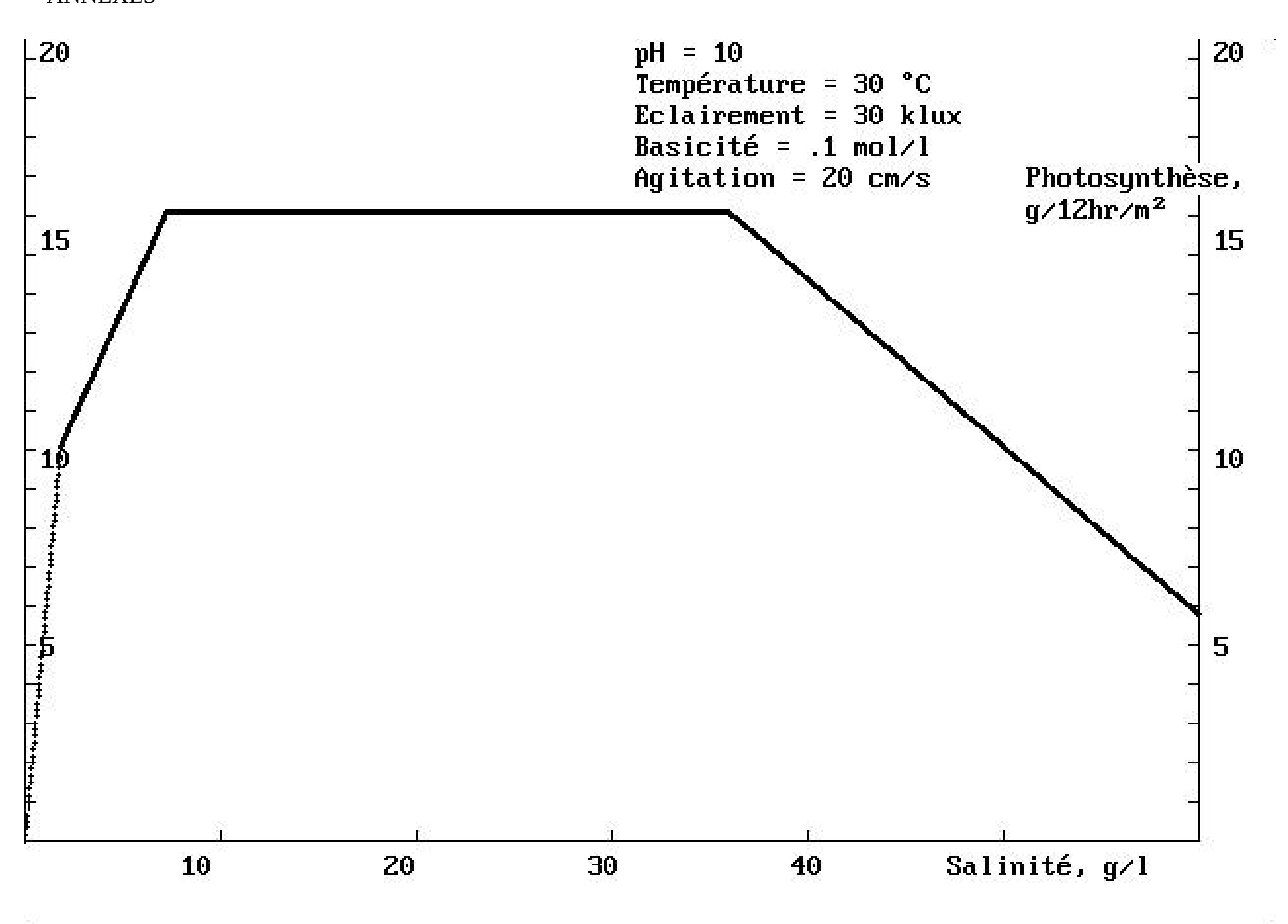
Vitesse photosynthèse de la spiruline en fonction de l'éclairement d'après la thèse de Zarrouk, Fig. 3 [BIBLIOGRAPHIE.htm - Zarrouk](BIBLIOGRAPHIE.htm)



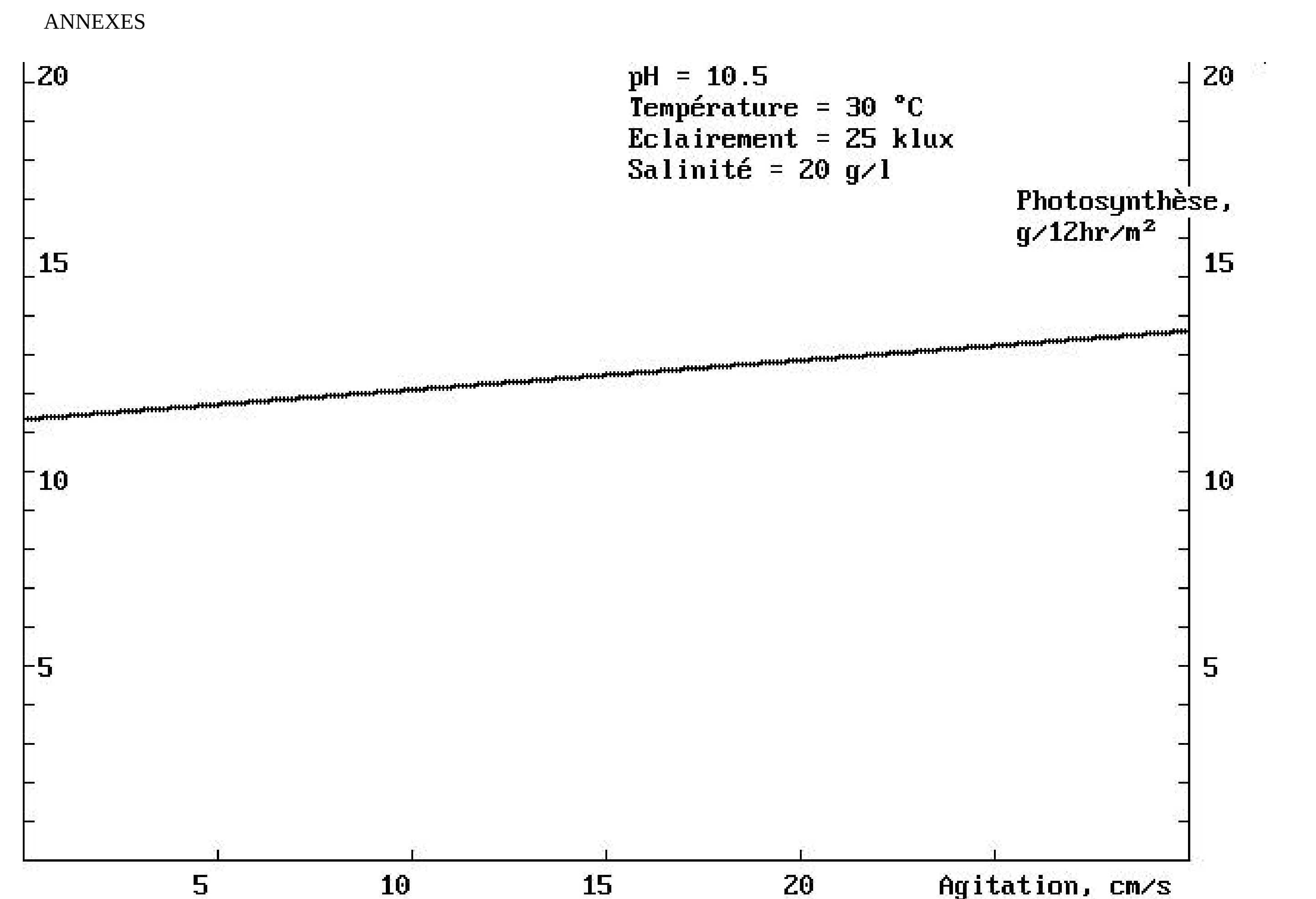
Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction du pH d'après la thèse de Zarrouk, Fig. 20



Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction de la température de la culture d'après la thèse de Zarrouk, Fig 19.



Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction de la salinité du milieu d'après la thèse de Zarrouk, Tableau IV



Vitesse de photosynthèse en fonction de l'agitation (fonction plus ou moins imaginaire, dans laquelle intervient aussi le pH)

A2) Mesure de la concentration en spirulines

Le "disque de Secchi" (instrument constitué d'une baguette de 30 cm de long, graduée en centimètres, portant à son extrémité inférieure un disque blanc) permet une mesure approximative, assez subjective, qui dépend du sujet, de l'éclairage, de l'angle, de la dimension du disque et de la turbidité du milieu de culture ("turbidité" = trouble + coloration) et pour une large part de la morphologie des filaments de spiruline, laquelle dépend en partie de la salinité du milieu. Les données ci-dessous ont été établies pour des salinités voisines de 12 g/litre.

Avant de mesurer, agiter pour homogénéiser, puis laisser décanter les boues quelques minutes. On note la profondeur, en centimètres, où il devient juste impossible de distinguer le disque.

Chacun devrait déterminer sa propre corrélation profondeur-concentration-turbidité, dans des conditions standard : filtrer un volume connu sur papier filtre (préalablement séché à l'étuve et pesé), presser délicatement et sécher à l'étuve, puis peser. Les deux tableaux ci-dessous ont été établis par l'auteur avec un disque blanc de 3 cm de diamètre sous un éclairage de 4000 lux (ombre pas trop sombre).

La turbidité est mesurée sur filtrat sans spiruline, avec un disque noir (cf A6.1.2 Turbidité).

SECCHI POUR SOUCHE SPIRALEE

- Turbidité nulle (>30 cm)

1,0 cm = 1,05 g/l

1,5 cm = 0,75

2,0 cm = 0,55

2,5 cm = 0,43

3,0 cm = 0,34

4,0 cm = 0,24

5,0 cm = 0,19

8,0 cm = 0,10

- Turbidité 12 cm

2,0 cm = 0,5 g/l

3,0 cm = 0,3

4,0 cm = 0,21

5,0 cm = 0,16

- Turbidité = 6 cm

1,0 cm = 0,75 g/l

2,0 cm = 0,35

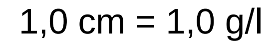
3,0 cm = 0,19

4,0 cm = 0,10

5,0 cm = 0,05

SECCHI POUR SOUCHE ONDULEE

- Turbidité nulle (>30 cm)



1,0 cm = 1,0 g/l

1,5 cm = 0,55

2,0 cm = 0,40

3,0 cm = 0,24

4,0 cm = 0,16

5,0 cm = 0,11

8,0 cm = 0,06

- Turbidité = 6 cm

1,0 cm = 0,85 g/l

1,5 cm = 0,50

2,0 cm = 0,35

3,0 cm = 0,20

4,0 cm = 0,10

5,0 cm = 0,05

- Turbidité = 4 cm

1,0 cm = 0,70 g/l

1,5 cm = 0,36

2,0 cm = 0,20

2,5 cm = 0,11

3,0 cm = 0,06

N.B. 1) Jacques Falquet, d'Antenna Technologie, a mis au point un "Secchi électronique" dont la réponse est indépendante de la lumière et de l'opérateur, mais pas des autres facteurs.

2) L'utilisation d'un instrument pour mesurer la concentration en spiruline devient en général inutile lorsque l'opérateur a acquit beaucoup d'expérience. Il sait juger la concentration d'après

l'apparence de la culture.

A3) Mesure de la salinité du milieu de culture avec un densimètre

On admet que la présence de spirulines dans un milieu de culture ne modifie pas sa densité.

On utilise un densimètre pour densités supérieures à 1 (comme ceux vendus dans les boutiques d'aquariophilie ou pour mesurer la densité des urines). La lecture se fait au niveau inférieur du ménisque. Attendre que les microbulles d'air soient éliminées avant de faire la lecture.

La densité DT à la température T ° C et la densité D20 à 20° C sont reliées par la formule:

D20 = DT + 0,325 x (T - 20), g/l

La salinité SAL et D20 sont reliées par les formules approchées suivantes pour milieu de culture à base de sels de cendres ou de bicarbonate de sodium :

si D20 est supérieure à 1007,6 :

SAL = 1,250 x (D20 - 1007,6) + 10, g/litre

ou sinon par:

SAL = 1,041 x (D20 - 998), g/litre

Un petit programme salinité.exe permet de calculer facilement la salinité à partir de la température du milieu et de sa densité mesurée à cette température. Il permet de faire la même opération sur des solutions de NaCl et de carbonate de sodium.

N.B. Il existe d'autres instruments, plus modernes, pour mesurer la salinité : le conductivimètre et le réfractomètre.

A4) Mesure du pH d'un milieu de culture

Seul un pHmètre de bonne qualité et bien étalonné permet de suivre l'évolution fine du pH d'une culture et de régler éventuellement la marche de la culture tout près du pH maximum autorisé de 11,2.

Le pH varie avec la température. Certains pH-mètres possèdent une correction automatique de température. Le pH mesuré à T° C doit être majoré de 0,00625 x (T - 25) pour obtenir la valeur à la température standard de 25° C.

Certains pH-mètres sont équipés d'une échelle en milliVolts plus robuste que l'échelle en pH. Elle permet de calculer le pH à partir de l'indication en mV par la formule théorique:

pH à T° C = (K1 - mV) x K2 /(273 + T)

où K1 et K2 sont deux constantes dépendant de l'électrode (électrode de verre) qu'on détermine par étalonnage à partir de solutions étalons de pH. Cette formule peut s'écrire, pour T = 25° C:

pH = A - mV/B

où A est le pH pour 0 mV et B est la pente en mV/ unité de pH. Des valeurs usuelles sont par exemple A = 7 et B = 50. La valeur des mV mesurés ne dépend pratiquement pas de la température, ce qui est heureux car cela dispense de faire une correction de température: il suffit d'appliquer la formule à la température de référence.

Pour prolonger la durée de vie d'un pH-mètre, le conserver à l'abri de l'humidité. Pour prolonger la durée de vie de son électrode, maintenir l'extrémité sensible de l'électrode dans une solution saturée de chlorure de potassium dans l'eau distillée, à température supérieure à 15° C, et la rincer soigneusement avant et après les mesures, à l'eau propre et si possible distillée. Si des moisissures s'installent dans la solution de KCl, mieux vaut la renouveler.

La fragilité, la durée de vie limitée des électrodes, et leur coût élevé, rendent difficile l'utilisation d'un pH-mètre professionnel dans beaucoup de situations. Un pH-mètre bon marché, type "stylo", réétalonné fréquemment, peut rendre service, mais sa durée de vie risque d'être courte. Les papiers pH ne sont pas assez précis.

Les solutions étalons de pH vendues dans le commerce sont coûteuses, mais il est possible de les économiser en utilisant les solutions étalons approximatifs suivants (conserver celles à pH moyens à l'abri de la lumière pour éviter que des algues s'y développent spontanément) dont les pH indiqués correspondent à 25° C:

- acide chlorhydrique N (36,5 g/l): **pH 0,1**; N/10: **pH 1** ; N/100: **pH 2**

- jus de citron: **pH 2,3**

- vinaigre "à 6 degrés" (6% d'acide acétique, densité 1,01): **pH 2,8**

- solution aqueuse à 5,8 g/l de phosphate monoammonique: **pH 4**

- jus de tomate: **pH 4**

- solution aqueuse à 5,8 g/l de phosphate monoammonique + 11 g/l de bicarbonate de sodium: **pH 7**

- bicarbonate de sodium N/10 (8,4 g/l): **pH 8,3**

- solution aqueuse à 5,3 g/l de carbonate de sodium + 4,2 g/l de bicarbonate de sodium (ou 1,4 g/l de soude + 5,46 g/l de bicarbonate) à l'équilibre avec l'atmosphère (conserver en contact avec l'atmosphère extérieure, ne pas boucher le récipient, rajouter de l'eau pour compenser l'évaporation): **pH 9,8** (varie un peu selon teneur de l'air en CO2 et l'altitude)

- carbonate de sodium N/10 (10,6 g/l): **pH 11,6**

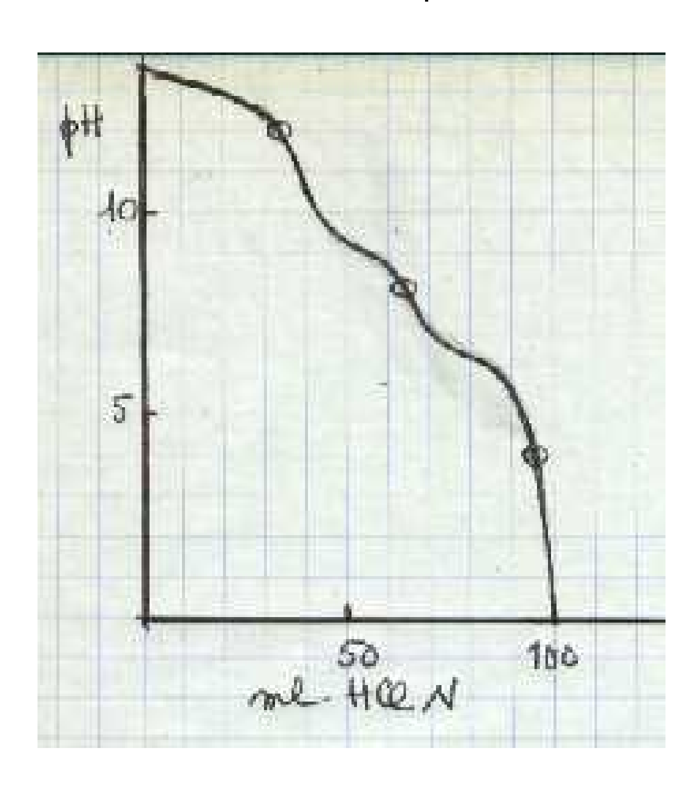
- soude N/100: **pH 12**; N/10: **pH 13**; N (40 g/l): **pH 14**

N.B. Avec de l'expérience il est possible de se passer de pH-mètre pour conduire une culture de spiruline, surtout si l'on cultive sous ombrage ou avec addition de bicarbonate ou de sucre.

A5) Mesure de l'alcalinité (alcalimétrie)

On neutralise progressivement un échantillon du milieu de culture ou de l'eau de cendre à étudier par un acide fort de normalité connue (par exemple 100 ml d'acide chlorhydrique concentré + 900 ml d'eau donne de l'acide "N", c'est-à-dire à une molécule-gramme/litre) jusqu'à pH = 4. Soit V le volume d'échantillon et V' le volume d'acide N utilisé. L'alcalinité est égale à V'/V, moles/litre. N.B.: la chute du pH est très brusque en dessous de 4. Si le titre de l'acide n'est pas exactement N, corriger V' proportionnellement.

Exemple: alcalimétrie sur 200 ml d'eau de cendre partiellement carbonatée:



Sur ce graphique, à pH 4 on lit V' = 96 d'où alcalinité totale 96/200 = 0,48 N (soit 0,48 mole de base/litre). A pH 12 on lit V' = 33 d'où potasse libre 33/200 = 0,165 N.

A pH 8 on lit V' = 62 d'où carbonate de potasse = (62 - 33)/200 = 0,145 mole/l, soit 0,29 N.

L'inflexion à pH 8 correspond à la transition carbonate/bicarbonate (ici il n'y avait pas de bicarbonate dans l'échantillon, celui qu'on dose provient de l'acidification du carbonate). Ce qu'on appelle couramment "alcalinité" ou "basicité" correspond à l'alcalinité totale mesurée à pH 4.

N.B. Si l'on n'a pas de ph-mètre, on peut utiliser un indicateur coloré virant autour de pH = 4, comme le méthylorange (10 gouttes de solution aqueuse à 1 % pour 100 ml d'échantillon à étudier) qui vire de l'orange au rouge, ou le papier au "rouge Congo".

Attention: L'acide chlorhydrique "concentré" vendu dans certains pays n'est qu'à 20% d'HCl.

A6) Tests de qualité faciles à réaliser

A6.1) Test sur cultures

A6.1.1) Test de filtrabilité

Pour caractériser la vitesse de filtration, un test standard a été établi. Mesurer 400 ml de culture à tester et la verser en 5 secondes dans un filtre à café garni d'un papier-filtre type "Grand Jury" N° 4 ou équivalent. Noter le volume filtré en une minute. Un volume supérieur à 250 ml correspond à une filtration facile. Ne pas négliger l'effet de la température ni de la nature du papier sur ce test. Il est recommandé d'établir sa propre échelle de valeurs avec le type de papier disponible. Il est intéressant de refaire le test sur le filtrat obtenu, ce qui donne une indication sur la part de résistance à la filtration due à la biomasse et celle due aux impuretés du milieu.

A6.1.2) Mesure de la turbidité du milieu de culture

Elle se fait à l'ombre sur le filtrat obtenu lors du test de filtration (A6.1.1), comme une mesure de concentration au disque de Secchi. Un disque de Secchi noir est préférable si la coloration est faible. Attendre que la mousse et les microbulles d'air soient éliminées avant de faire la lecture. Attention : les spirulines filtrant mal ont tendance à passer à travers le papier filtre, en rendant vert le filtrat ; dans ce cas il peut être préférable de refiltrer le filtrat sur papier double pour éliminer les spirulines avant de mesurer la turbidité vraie du milieu.

A6.1.3) Mesure de l'aptitude au lavage de la biomasse

Après le test de filtrabilité (§ A6.1.1), verser 400 ml d'eau douce dans le filtre en délayant la biomasse et noter le volume filtré en une minute. Si la biomasse est du type "lavable" (ses cellules n'éclatant pas au contact de l'eau douce) ce volume reste proche de celui du test de filtrabilité. Confirmer par un examen microscopique de la biomasse lavée.

A6.2) Tests sur spiruline

A6.2.1) Test de pH

Il est facile d'obtenir une idée de la qualité du lavage ou de l'essorage de la biomasse, soit en prenant le pH de la biomasse pressée (qui doit être entre 7 et 9), soit en mesurant le pH d'une suspension à 4 % de spiruline sèche dans l'eau. Lorsqu'une spiruline a été séchée à température assez haute (60 à 65° C) et qu'elle est réhydratée, ses cellules éclatent et le pH baisse, jusqu'à 5 parfois. Le pH obtenu est d'autant plus bas que la spiruline est bien essorée. Ce bas pH serait du à l'acidité interne des cellules et/ou à la fermentation commençante.

A6.2.2) Estimation des pigments

Dans le test de pH du § précédent les pigments sont libérés et il est possible de les voir et de juger de leur concentration. Le bleu est parfois lent à sortir (attendre 24 heures par sécurité, en agitant de temps en temps). Parfois il faut préalablement au test chauffer quelques minutes la poudre à 65 ° C pour mieux faire éclater les cellules.

Pour apprécier la concentration en phycocyanine (pigment bleu), il suffit de mettre une goutte de solution décantée sur un papier buvard ou papier filtre bien plat et horizontal: on obtient un chromatogramme très net; la coloration et la surface de la tache bleue est une indication de la concentration en phycocyanine. Faire un test parallèle avec une spiruline de concentration connue en phycocyanine, avec la même concentration (4 % dans l'eau), et faire la comparaison des taches à partir de gouttes de même volume.

Pour apprécier la concentration en caroténoïdes (donc en béta-carotène), mélanger à la spiruline sèche en poudre deux fois son poids d'alcool à 90° ou d'acétone, agiter, couvrir et attendre 15 minutes: les caroténoïdes passent en solution, dont la couleur jaune brun plus ou moins forte est une mesure de la concentration. Utiliser le système de la tache sur papier filtre pour l'apprécier. Attention: la coloration de la tache est labile (oxydation).

A6.2.3) Test de couleur

La couleur verte de la spiruline de bonne qualité est facile à repérer. On peut avoir en stock des échantillons de référence pour comparaison. La nuance de vert dépend de la souche (la spiralée est moins foncée que l'ondulée) et du traitement (pressage., extrusion, centrifugation).

A6.2.4) Dosage colorimétrique simplifié de la phycocyanine

Une méthode plus précise pour mesurer la teneur en pigments est la colorimétrie. Partir de la même solution type "test de pH" qu'en Annexe 6.3. Soit C % la concentration de spiruline sèche mise à tremper dans l'eau autour de 4 %. Laisser décanter et prélever la solution bleue, la centrifuger si l'on dispose d'une centrifugeuse de laboratoire. Prélever la solution centrifugée ou bien décantée: environ 0,5 à 1 ml. Diluer ce prélèvement d'un facteur de 100 environ avec de l'eau. Soit DIL ce facteur de dilution, en volume. Mesurer au colorimètre ou spectrophotomètre (cuve à trajet optique 11 mm) la densité optique (DO) à 615 nanomètre (nm) de longueur d'onde, DO615, et à 652 nm, DO652. Calculer le % en poids de phycocyanine par la formule:

1,873 x (DO615-0,474 DO652) x DIL /C

Une valeur correcte est: > 10 % de la spiruline sèche.

N.B. La DO est égale au logarithme (base 10) du rapport lumière incidente/lumière transmise ou du rapport 100 / (% de transmission) ou 100/ (100 - % d'absorption).

A6.2.5) Dosage colorimétrique simplifié des caroténoïdes

Ajouter 25 % d'acétone ou, à défaut, d'alcool à 90°, à une suspension type "test de pH" ci-dessus, et la maintenir 24 heures au réfrigérateur. Soit C la concentration en spiruline dans cette suspension. Décanter, et si possible centrifuger, et prélever P ml de la solution (environ 0,5 ml). Diluer à l'acétone ou à l'alcool. Soit DIL le facteur de dilution en volume. Mesurer la densité optique à 450 nm. Soit DO450 cette densité. La concentration en caroténoïdes dans la spiruline s'obtient par la formule:

DO450 x DIL / 2,8 / C, mg/g

Une valeur correcte est 2,5 mg/g. Le béta-carotène représente environ la moitié des caroténoïdes.

N.B. La DO est égale au logarithme (base 10) du rapport lumière incidente/lumière transmise ou du rapport 100 / (% de transmission) ou 100/(100 - % d'absorption).

A6.2.6) Dosage de l'humidité dans la spiruline sèche (% d'eau)

Mettre la spiruline à tester (environ 200 g, inutile de peser) dans un récipient genre "Tupperware" (deux litres maximum), étanche et suffisamment transparent pour pouvoir lire l'hygromètre digital placé (scotché) à l'intérieur. Suivre l'évolution du % d'humidité relative (%HR) de l'air dans le récipient jusqu'à l'équilibre (environ 2 heures) : si ce % est inférieur à 45, la spiruline est conforme à la norme (< 9 % d'eau). Pour que la mesure soit exacte il faut que l'ensemble de mesure soit en équilibre non seulement d'humidité mais de température autour de 25° C.

Dans le domaine qui nous intéresse (%HR entre 10 et 60), le % d'eau dans la spiruline est égal à 1 + (%HR)/6 d'après nos mesures et d'après BIBLIOGRAPHIE.htm - Lembi.

A7-1) Absorption du gaz carbonique atmosphérique par le milieu de culture

Nous avons mesuré la vitesse d'absorption du CO_2 de l'air en suivant la décroissance du pH du milieu de culture sans spiruline, avec agitation faible et intermittente. Connaissant la surface exposée à l'air, la concentration en alcali, le volume par m² et la correspondance entre pH et C = rapport molaire CO_2/base (cf Annexe A11), il est facile d'en déduire la vitesse d'absorption du CO_2 en fonction du pH. On trouve des valeurs croissantes de 0 pour le pH correspondant à l'équilibre avec l'air (vers pH 9,8), à l'équivalent d'environ 4,5 g de spiruline/jour/m² vers pH 11.

La théorie dit que la vitesse d'absorption est proportionnelle au coefficient d'absorption et à la différence des pressions de vapeur de CO_2 dans l'air et sur le liquide. La pression de vapeur du CO_2 sur une solution de carbonate/bicarbonate de sodium est donnée dans la littérature. Kohl et Riesenfield (1960) donnent dans "Gas Purification" BIBLIOGRAPHIE.htm - kohl à la page 117, une formule ayant comme variables la température, la basicité et le rapport c (moles de CO2/mole de base), en mmHg:

$$pCO_2 = 68,5 \times b^{1,29} \times (2c - 1)^2 / [(1 - c) \times (333 - 1,8 \times t) \times (0,0487 - 0,0006 \times t)]$$

où

b = basicité du milieu absorbant, gmoles de base forte/litre

c = rapport molaire CO_2/base correspondant au pH du milieu

t = température du milieu,° C

L'absorption du CO_2, exprimé en g de spiruline/jour/m² (en admettant 1,8 kg de CO_2 par kg de spiruline) se calcule alors par la formule:

0,772 x ka x [0,00076 x vpm x (1 - alt/10000) - pCO_2]

où

ka = coefficient d'absorption,

gmoles de CO_2 absorbés/heure/m² /atmosphère

vpm = teneur de l'air en CO_2, ppm volumiques

alt = altitude, mètres

0,772 = (44 x 24)/(1,8 x 760)

La valeur de ka moyenne résultant des mesures d'absorption directes et indirectes (productivités des bassins de spiruline alimentés en carbone uniquement à partir de l'air) se situe autour de 23. Nos mesures directes effectuées en 1991 en bassines donnaient ka = 25. En août 1999 un bassin de 6 m² a été rempli de 1000 litres de milieu de culture à base de soude N/10 et agité comme une culture normale. Son pH est tombé de 12,44 à 10,68 en 16 jours, ce qui correspond à ka = 24. Donc ka = 20 donne une marge de sécurité importante.

A7-2) Analyse du CO_2 dans l'air

La formule ci-dessus donnant pCO_2 permet de mesurer la teneur de l'air en CO_2 avec un matériel très simple, alors qu'un analyseur à infrarouge coûte 4000 U.S.$. Il suffit de faire barboter un petit débit d'air (mini compresseur d'aquarium) à travers un diffuseur au fond d'une éprouvette contenant une solution de bicarbonate de sodium à 8,4 g/l (basicité 0,1 N), et de mesurer le pH à l'équilibre. Le résultat dépend de la température de la solution. Cette méthode est évidemment inadaptée aux changements brusques de teneur de l'air en CO_2, à cause de l'inertie de la solution. Pour diminuer cette inertie on a intérêt a réduire le volume de solution et à diviser finement le gaz barbottant.

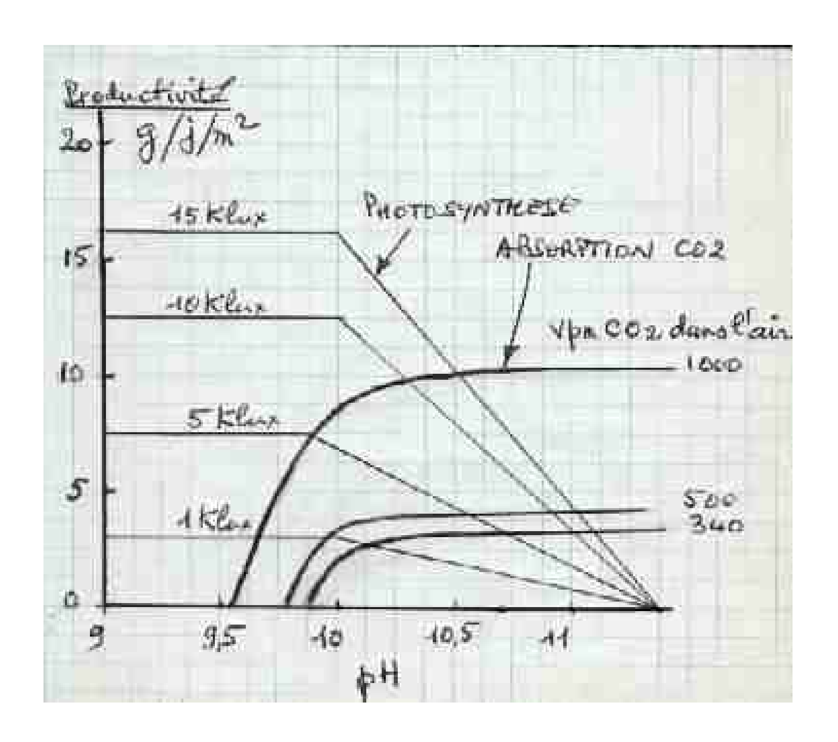
Pour des mesures à long terme, conserver l'éprouvette à l'abri de la lumière pour éviter son

verdissement et ajouter de l'eau distillée pour maintenir le niveau s'il y a évaporation (si la température de la solution est inférieure à la température de rosée de l'air analysé, la solution se diluera progressivement : dans ce cas il faut rajouter du bicarbonate pour maintenir sa basicité à 0,1 N).

Un petit programme gazcarb.exe permet de calculer très facilement la teneur de l'air en CO2 (en vpm = volumes par millions) en fonction de la température et du pH de la solution à l'équilibre. Le programme fournit un tableau pH/vpm pour chaque température désirée.

A8) Interaction Photosynthèse/Absorption de CO2

Ce graphique présente des exemples de variation de la vitesse d'absorption du CO2 de l'air



en fonction de la teneur de l'air en CO2 et du pH du milieu de culture, calculée d'après la formule donnée en Annexe A7 (formuleCO2), comme au § A6-2, mais exprimée en équivalent spiruline à raison de 1,8 g/g de spiruline pour les conditions: altitude = 0, température = 30° C, ka = 18 et basicité = 0,1 N. On voit qu'il y a peu à gagner à travailler à pH > 10,3. Sur ce même graphique ont été reportées des exemples de variation de la vitesse de photosynthèse, exprimée dans la même unité que l'absorption du CO2 (en productivité de spiruline), en fonction du pH, pour une luminosité données, en l'absence d'autres facteurs limitant. Ces exemples ne sont donnés qu'à titre illustratifs sans valeur précise des paramètres autres que le pH, simplement pour faire saisir le mécanisme de l'interaction. photosynthèse/absorptoion du CO2.

Si l'on suit une de ces courbes de vitesse de photosynthèse en partant du pH minimum, on voit que cette vitesse diminue au delà de pH 10. Simultanément la vitesse d'absorption du CO2 croit et il vient un moment où les deux vitesses sont égales (les deux courbes se croisent): à partir de là, le pH ne peut plus continuer à croître; ce point d'équilibre correspond à la vitesse de photosynthèse sous une atmosphère ayant la teneur en CO2 indiquée. Le pH à l'équilibre correspondant est d'autant plus haut que les conditions de photosynthèse (lumière, agitation)

sont meilleures et que la teneur en CO_2 de l'air est plus basse.

A9) Productivité en fonction de l'ombrage calculée par Modèle de simulation "SPIRULIN", avec taux de purge 1 % et avec ajout de 18 g CO_2/jour/m² :

0 % d'ombre = 14,3 g/jour/m²

50 % d'ombre = 13,3 g/jour/m²

75 % d'ombre = 9.9 g/jour/m²

80 % d'ombre = 8,4 g/jour/m²

On voit la faible influence du taux d'ombrage jusque vers 50 %.

A10) Consommation d'eau en fonction de l'ombrage calculée par Modèle de simulation "SPIRULIN", avec taux de purge 1 % et avec ajout de 18 g CO_2/jour/m² :

0 % d'ombre = 732 litres d'eau/kg de spiruline

65 % d'ombre = 556 litres d'eau/kg de spiruline

75 % d'ombre = 623 litres d'eau/kg de spiruline

80 % d'ombre = 698 litres d'eau/kg de spiruline

Il existe un minimum de consommation d'eau vers 65 % d'ombrage.

A11) Correspondance entre pH et rapport molaire C = CO_2/base (soude ou potasse)

Cette relation est d'une grande importance pour de nombreux calculs intéressant la culture de spiruline. Elle a été établie expérimentalement. Elle dépend faiblement de la basicité.

Un petit programme de calcul reproduit cette relation : Phexc.exe.

A12) Mélanges de carbonate et bicarbonate (de sodium)

a) Pour obtenir une solution aqueuse ayant les caractéristiques suivantes : rapport molaire CO_2/base forte = C et basicité b moles/litre, on peut dissoudre les produits suivants dans un litre d'eau :

Carbonate de sodium = 106 x b (1 - C), grammes

+ Bicarbonate de sodium = 84 x b x (2C - 1), grammes

Un petit progrmme de calcul marie cette relation avec celle de l'Annexe A11 et permet de calculer les mélanges carbonate + bicarbonate et soude + bicarbonate donnant un pH désiré pour un basicité donnée : carbicar.exe.

b) Pour passer d'une solution caractérisée par Ci et b à une solution caractérisée par Cf et b, on peut ajouter à un litre de la première

(Cf - Ci) / (1 - Cf) = E, litre d'eau + 84 x E x b, grammes de bicarbonate de sodium.

Mise en garde : le carbonate acheté peut être un mélange de carbonate et bicarbonate (soit par bicarbonatation naturelle du carbonate stocké dans certaines conditions, soit parce qu'il s'agit de natron ou trona) ; avant d'utiliser du carbonate vérifier sa teneur en bicarbonate en prenant le pH d'une solution à 5 g/l.

A13) Neutralisation de l'eau de cendre par le bicarbonate de soude

L'extrait aqueux de cendres de bonne qualité présente généralement un très haut pH lorsqu'il vient d'être fait, jusqu'à 13. Avant de l'utiliser comme base de milieu de culture il faut attendre longtemps (par exemple 15 jours) pour que son pH baisse suffisamment par absorption de CO2 de l'air.

Un artifice pour rendre de tels extraits utilisables instantanément est d'y dissoudre du CO2 pur ou du bicarbonate de soude. La quantité de bicarbonate ("bicarb") à ajouter pour abaisser le pH à 10,5 peut être calculée par l'une ou l'autre des formules suivantes:

bicarb = 187 x (0,55 - C) x b, g/l

bicarb = 1,83 x S - 234 x C x S / (56 + 26 x C), g/l

formules où

C = rapport molaire CO2/base, déterminé à partir du pH (cf Annexe A11)

b = normalité alcaline de l'eau de cendre, moles/l

S = salinité alcaline (potasse + carbonate de potasse) de l'eau de cendre, g/l

= b x (56 + 26 x C)

N.B. La salinité alcaline S peut se calculer approximativement à partir de la salinité totale déterminée par la densité (en général la salinité alcaline représente les 2/3 de la salinité totale), mais il est plus précis de la déterminer par alcalimétrie à partir de C et b.

Exemple: Une eau de cendres a une densité de 1,013 et un pH de 12,45 à 25° C, soit une salinité totale de 18 g/l et C = 0,4; l'alcalimétrie donne b = 0,2 soit une salinité alcaline S = 13,3;

bicarbonate à ajouter = 5,6 g/l.

Application aux solutions de soude caustique :

L'obtention de milieux de culture à base de soude caustique peut être considérée comme un cas particulier de la neutralisation de l'eau de cendre (laquelle est une solution de potasse caustique). Ce cas peut être utile lorsque le carbonate est plus rare que la soude, pour obtenir des milieux à pH moyen. Exemples de mélanges de soude et de bicarbonate de soude pour b = 0,1 moles/litre:

- 5,4 g de bicarbonate de sodium + 1,44 g de soude par litre d'eau = pH 10,0
- 5,0 g de bicarbonate de sodium + 1,6 de soude par litre d'eau = pH 10,2
- 4,6 g de bicarbonate de sodium + 1,8 de soude par litre d'eau = pH 10,5

N.B. L'utilisation de soude caustique est sujette à restriction (cf Annexe A16.1, N.B.).

A14) Composition de divers produits

(N.B.: ppm = mg/litre ou mg/kg)

Sel de mer brut (non raffiné) Analyse du sel de La Salorge de Guérande:

Phosphore: pratiquement 0; potassium: 1 à 2 g/kg; soufre: 3 à 7 g/kg; magnésium: 4 à 8 g/kg; calcium: 1 à 2 g/kg; cuivre: 2,5 ppm; zinc 0,5 à 2 ppm; manganèse: 4 à 8 ppm; fer 30 à 100 ppm.

Cendre de bois

Dumon donne la composition suivante de la cendre en g/kg: Phosphore: 43; soufre: 8; potassium 219; magnésium: 90; calcium 236; manganèse: 50; fer: 14. Teneur en solubles très variable (de 1 à 25 %).

Analyse moyenne de sels solubles extraits de cendres, vendus sur les marchés burkinabés : mélange de carbonate et bicarbonate de potassium (à 15 % en poids de bicarbonate) avec 10 % de sulfate dipotassique, 0,1 % de phosphate et de calcium et des traces de magnésium.

La solubilité du magnésium et du calcium contenus dans la cendre dépend beaucoup du pH: presque nulle à pH 13, elle est notable à pH 10 (environ 100 ppm de magnésium dans l'eau de cendre, qui est par ailleurs très riche en soufre: 1500 ppm).

Eaux

Les eaux de rivière ont en moyenne les teneurs typiques suivantes (en ppm): fer = 0,1; calcium = 40; magnésium = 14; soufre = 6. L'appoint d'eau au bassin apporte alors généralement assez de

magnésium et de soufre.

L'eau du puits de la Cté du Pain de Vie à Arequipa, Pérou a les teneurs suivantes (en ppm): calcium = 72; magnésium = 16; soufre = 50; potassium et phosphore = négligeables. Si l'évaporation est de 2,4 mm/jour, l'appoint d'eau apporte le soufre et le magnésium, et bien sûr le calcium, pour 20 g de spiruline/jour/m² .

L'eau du puits du Foyer de Charité de Bangui (RCA) ne contient pratiquement ni calcium ni magnésium ni fer. Il en est de même de l'eau de la ville de Linares, Chili.

L'eau du puits de l'Ecole d'Agriculture de Catemu, Chili, contient 96 ppm de calcium, 34 de magnésium et 130 de soufre.

Analyse de l'eau d'un lac à spirulines près de Tuléar (Madagascar) : sel = 35 g/l; bicarbonate + carbonates de sodium (pH 10) = 16 g/l; soufre (des sulfates) = 0,5 g/l; fer = 0,44 ppm; calcium = 6,5 ppm; magnésium = 80 ppm; phosphore = 3,6 ppm; azote = 0,3 ppm (dont 0,2 ammoniacal).

Eau du Gardon de Mialet : 22 ppm de calcium et 2,4 ppm de magnésium

Eau de mer (ppm): fer: 0,002 à 0,02 ; calcium: 400; magnésium: 1272; phosphore: 0,001 à 0,01; soufre: 900; bicarbonate < 150.

Urine humaine

Elle contient : Azote = 7 à 12 g/l; phosphore = 0,5 à 0,7 g/l; potassium = 2 à 3 g/l; soufre = 0,8 à 1,2 g/l; sel (chlorure de sodium) = 12 g/l; calcium = 0,13 g/l; magnésium = 0,1 g/l; fer = 0,3 mg/l; sucres = 0,15 g/l. Sa "production" est d'environ un litre par jour par personne.

Nitrate du Chili (Salitre potásico)

Ce produit naturel correspond à 2 NaNO3.KNO3; il contient 15 % d'azote, 18,4% de sodium, 11,6% de potassium, 1% de soufre (sous forme de sulfates), ainsi que: 0,12% de calcium, 0,14% de magnésium et de nombreux oligo-éléments (tous les micronutrients nécessaires pour la spiruline). Il est coloré en rose. A ne pas confondre avec le KNO3 (blanc) pur, extrait du salitre, donc également "naturel".

Sang : Azote: 350 mg/l; phosphore: 30 à 70 mg/l; fer: 9 g/l

A15) Matériel de laboratoire utile (voir A.htm - A29**)**

A16.1) Produits chimiques

(Les % indiqués sont les % en poids sur produit pur sauf indication contraire; pm = poids molaire)

- Acide chlorhydrique HCl, pm = 36,5

- Acide citrique COOH-CH2-C(OH)(COOH)-CH2-COOH, pm = 192

- Acide orthoborique H_3BO_3, pm = 61,8 (17,14 % de bore)

- Acide phosphorique H_3PO_4, pm = 98 (31,6 % de phosphore)

- Acide sulfurique H_2SO_4, pm = 98 (32,7 % de soufre)

- Alum de chrome cristallisé, $CrK(SO_4)_2$, 12 H_2O, pm = 499,4

(10,3 % de chrome)

- Bicarbonate d'ammonium, pm = 79 (17,7 % d'azote)

- Bicarbonate de sodium, pm = 84

- Bicarbonate de potassium, pm = 100

- Butane C_4H_{10}, pm = 58 (82,8% de carbone)

- Carbonate de potassium, pm = 138

- Carbonate de sodium, pm = 106

- Chaux, pm = 74 (54 % de calcium)

- Chlorure de calcium, pm = 111 (36 % de calcium)

- Chlorure de manganèse cristallisé à 4 H_2O, pm = 198 (27 % de manganèse)

- Chlorure de potassium, pm = 74,5 (52 % de potassium)

- Chlorure de sodium (sel de cuisine), pm = 58,5

- Chlorure de zinc, pm = 136,3 (46,5 % de zinc) [hygroscopique!]

- EDTA (acide éthylène-diamino-tétracétique), pm = 292

- EDTA, sel disodique cristallisé à 2 H_2O, pm = 372 (78 % d'EDTA)

- Gaz carbonique, pm = 44 (27,3 % de carbone)

- Magnésium, pm = 24,5

- Monovanadate d'ammonium NH_4VO_3, pm = 117 (43,6% de vanadium)

- Molybdate de sodium $MoNa_2O_4,2H_2O$, pm = 242 (39,7% de molybdène)

- Monovanadate d'ammonium NH_4VO_3, pm = 117 (43,6 de vanadium)

- Nitrate d'ammonium ou ammonitrate (explosif à sec), pm = 80 (35 % d'azote dont la moitié ammoniacal)

- Nitrate de calcium, pm = 164 (24 % de calcium et 17 % d'azote)

- Nitrate de sodium, pm = 85 (16,5 % d'azote; 72,9 % de NO_3;

27 % de sodium)

- Nitrate de potassium, pm = 101 (13,9 % d'azote, soit 61,4% de N03; 38,6% de potassium; qualité technique à 91 % de pureté)

- Oxyde de molybdène, MoO_3, pm = 143,9 (66 % de molybdène)

- Oxyde de sélénium, SeO_2, pm = 111 (70,4 % de sélénium)

- Phosphore, pm = 31

- Phosphate monoammonique, pm = 115 (27 % de phosphore et 12 % d'azote)

- Phosphate diammonique, pm 132 = (23,4 % de phosphore et 21 % d'azote)

- Phosphate dipotassique, pm = 174 (17,8 % de phosphore et

44,8 % de potassium, pureté 97 %) [hygroscopique!]

- Phosphate mixte d'ammonium et de magnésium, pm = 137 (10 % d'azote), très insoluble

- Phosphate monopotassique, pm = 136 (22,7% de phosphore,

28,7% de potassium)

- Phosphate tricalcique, pm = 310 (20 % de phosphore, 39 % de calcium)

- Phosphate trisodique cristallisé à 12 H_2O, pm = 380 (8,1 % de phosphore)

- Propane C_3H_8, pm = 44 (81,8 % de carbone)

- Salitre potassique: 15 % d'azote (soit 66 % de NO_3), 18,4 % de sodium, 11,6 % de potassium, 1,2 g de calcium/kg, 1,4 g magnésium/kg, 10 g de soufre (soit 30 g de SO_4)/kg

- Sélénite de sodium (Na2SeO3), pm = 173 (45,6% de sélénium) [toxique]

- Soude NaOH, pm = 40 (cf N.B. en bas de page)

- Sucre (= saccharose = sucrose = C12H22O11), pm = 342 (42 % de carbone)

- Sulfate de calcium, pm = 136 (29 % de calcium, 23,5 % de soufre)

- Sulfate de cobalt à 7 H2O, pm = 281,1 (20,3 % de cobalt)

- Sulfate de cuivre cristallisé à 5 H2O, pm = 249,7 (24,9 % de cuivre)

- Sulfate de magnésium cristallisé à 7 H2O (sel d'Epsom), pm = 246,5

(9,6 % de magnésium et 12,7 % de soufre, pureté 98 %)

- Sulfate de nickel NiSO4, 6H2O, pm = 262,9 (22,3% de nickel)

- Sulfate dipotassique, pm = 174 (44,8 % de potassium et 18,4 % de soufre)

- Sulfate de fer FeSO4, 7 H2O, pm =278 (20 % de fer)

- Sulfate de zinc cristallisé à 7 H2O: pm = 287,4 (22,7 % de zinc)

- Urée, CO(NH2)2, pm = 60 (46 % d'azote, qualité engrais agricole)

N.B. Certaines soudes sont fabriquées à l'aide de mercure et peuvent contenir jusqu'à 0,08 mg de mercure par kg (selon recommandation d'Euro Chlor du 26/11/1997). Il convient d'en tenir compte en cas d'utilisation de soude pour préparer un milieu de culture, de manière à ne pas dépasser la norme en mercure dans la spiruline (cf Annexe A17), mais en général cela ne pose pas de problème. La soude solide "perlée" est facile à utiliser. Attention: la soude est un produit très dangereux pour la peau et les yeux (porter des lunettes de protection).

A16.2) Densités apparentes (approximatives)

En l'absence de balance, il est possible de mesurer les volumes de produits:

Densité apparente, g/ml

Acide phosphorique liquide 85% = 1,69 (à 20° C)

Bicarbonate de sodium léger = 0,53 à 0,73

Bicarbonate de sodium dense = 1,1 à 1,2

Phosphate dipotassique = 0,8

Phosphate monoammonique = 0,8

Salitre potasico = 1,3

Sel NaCl = 1 à 1,2

Spiruline broyée = 0,5 à 0,6

Sulfate de magnésium $MgSO_4,7H_2O$ = 1

Sulfate dipotasique = 1,2

Sulfate de fer $FeSO_4,7H_2O$ = 1,15

Urée = 0,84

A17) Normes de la spiruline en France

(Voir Arrêté du 21/12/1979)

Par rapport au poids sec, en ppm :

- Arsenic <= 3
- Plomb <= 5
- Etain <= 5
- Cadmium <= 0,5
- Mercure <= 0,1
- Iode <= 5000

Tant pour le produit frais que le sec :

- Germes aérobies (30° C) <= 100.000 / gramme
- Coliformes fécaux (44,5° C) < 10/ gramme
- Anaérobies sulfito-réducteurs (46° C) < 100/ gramme
- Clostridium perfringens <= 1/ gramme
- Staphylococcus aureus <= 100/ gramme

- Salmonella : absence dans 25 g.

N.B. Exemples de limites supérieures de pH pour la croissance de microorganismes des aliments (en présence de spirulines vivantes des valeurs différentes pourraient être obtenues) :

Staphylococcus = 9,8

Streptococcus = 9,3

Bacillus = 9,3

B. subtilis = 10

Clostridium botulinum = 8,5

Clostridium perfringens = 8,5

Clostridium sporogenes = 9

Lactobacillus = 8

E. coli = 10

Salmonella = 9

Vibrio parahaemolyticus = **11**

Pseudomonas = 8

Candida = 9,8

Saccharomyces = 8,6

Penicillium = **11**

Aspergillus = 9,3

Listeria monocytogenes = 9,6

A18) Limites de concentrations dans le milieu de culture

Tous les chiffres expriment des mg/litre (ou ppm). Ceux donnés entre parenthèses sont ceux du


milieu de culture de base de Zarrouk dans sa thèse (BIBLIOGRAPHIE.htm - zarrouk, page 4):

Nitrate* = 440 à 6600 (1800)

Ammonium* = 0,3 à 30

Urée* < 50

Phosphate** = 0,1 à 300 (270)

Potassium > 10 (665) et rapport pondéral K/Na < 5

Magnésium*** = 1 à 30 (19)

Sulfate** > 30 (675)

Fer > 0,4 (2)

Calcium**** > 0,6 (14)

Bore = (0,5)

Manganèse = (0,5)

Zinc < 1 (0,05)

Cuivre < 0,001 ? (0,02)

Molybdène = (0,01)

Chrome = (0,01)

Nickel = (0,01)

Cobalt = (0,01)

Notes:

* a) Les doses minimum ne s'appliquent que s'il n'y a pas d'autre source d'azote. Les maxima pour ammonium et urée ne sont pas indépendants puisque l'urée s'hydrolyse en ammonium : c'est l'ammonium total potentiel qui compte, ou plus précisément l'ammoniac libre. Il y a équilibre entre ammoniaque (NH4OH) et ammoniac (NH3) dans l'eau, l'ammoniaque se dissociant elle-même en ions ammonium (NH4) et hydroxyle (OH) : cet équilibre dépend du pH et de la température. L'odeur d'ammoniac est perceptible dès 20 ppm d'ammonium à pH 10 et 20 ° C. Plus le pH est haut, plus il y aura d'ammoniac libre selon le tableau suivant (à 25° C) :

pH 6 = 0 % d'ammoniac, 100 % d'ammonium

pH 8 = 4 %

pH 9 = 25 %

pH 10 = 78 %

pH 10,2 = 92 %

On pense que c'est l'ammoniac qui est toxique plutôt que l'ammonium.

La vitesse d'hydrolyse de l'urée dépend elle-même du pH et de la température. Il nous est arrivé, en pleine saison de production, de mettre par erreur 350 ppm d'urée sans que la culture meure (hydrolyse lente ?).

b) Il y a réduction possible du nitrate en ammoniac selon la réaction globale:

$NO_3K + 2CH_2O$ (hydrate de carbone) = $NH_3 + 2CO_2 + KOH$

Notons en passant que la réduction du nitrate donne une augmentation de la basicité, quel que soit l'agent réducteur. Cette équation signifie qu'un kilo de sucre risque d'être équivalant à 500 g d'urée en tant que production potentielle d'ammoniac. **C'est donc la somme urée plus sucre qu'il faut considérer pour calculer la limite de toxicité, soit la règle pratique: "dose quotidienne d'urée + (dose quotidienne de sucre) / 2 < 50 - 1,7 x (concentration du milieu de culture en ammonium), où doses et concentration sont exprimées en mg/l** (en l'absence de sucre ou de nitrates, inutile de tenir compte du sucre dans cette formule). La mesure de la concentration en ammonium par colorimétrie avec le réactif de Nessler donne en réalité la somme ammonium + ammoniac.

** D'après la thèse de J.F.Cornet BIBLIOGRAPHIE.htm - Cornet : 0,7 ppm de phosphore et 3 ppm de soufre suffisent. Il est probable que 0,05 ppm de phosphore soit encore suffisant (cas de l'eau de mer).

*** Le phosphate mixte de magnésium et d'ammonium et le phosphate de magnésium, très peu solubles, forment facilement des cristaux dans le milieu de culture si leur produit de solubilité est dépassé. Il y a une relation entre le phosphate, le magnésium et l'ammonium, qu'on peut calculer par phos.exe.

**** A pH élevé (> 10,5) la solubilité du calcium diminue par précipitation de calcaire; les concentrations limites en phosphate et fer diminuent également.

Les limites sont souvent soit inconnues ou mal définies. Par exemple le cuivre à la dose utilisée par Zarrouk devrait être toxique. Il se peut que les limites dépendent des conditions de culture.

A.19) Composition élémentaire de la spiruline :

Carbone = 468 g/kg

Oxygene = 279 g/kg

Azote = 120 g/kg

Hydrogene = 95 g/kg

Potassium = 15 g/kg

Phosphore = 9* g/kg

Soufre = 6 g/kg

Chlore = 4 g/kg

Sodium = 2 g/kg

Calcium = 1** g/kg

Fer = 600 mg/kg (= ppm)

Bore = 80 mg/kg (= ppm)

Manganèse = 50 mg/kg (= ppm)

Zinc = 40 *** mg/kg (= ppm)

Cuivre = 12 mg/kg (= ppm)

Molybdène = 7 mg/kg (= ppm)

Nickel = 3 mg/kg (= ppm)

Chrome = 2,8 mg/kg (= ppm)

Vanadium = 2 mg/kg (= ppm)

Cobalt = 1,5 mg/kg (= ppm)

Selenium = 0,3 mg/kg (= ppm)

* ou 12 quand la spiruline est produite dans des conditions où peu d'EPS se forme (d'après Thèse de J.F.Cornet BIBLIOGRAPHIE.htm - Cornet, page 166).

** très variable: un ouvrage récent donne une teneur en calcium de 7 g/kg (BIBLIOGRAPHIE.htm - Vonshak1997, page 149) et les notices Flamant Vert et Solarium Biotechnology 10 g/kg.

*** peut être augmenté jusqu'à 1g/kg si souhaité.

La composition en produits nutritionnels est donnée en Annexe A20. On notera certaines différences importantes avec le tableau ci-dessus, notamment sur le calcium, le sodium et le fer; la composition de la spiruline est sujette à variations en fonction des conditions de culture. Ainsi Cornet (BIBLIOGRAPHIE.htm - Cornet, page 125) indique pour la spiruline produite à faible flux lumineux (5 à 20 W/m²), en g/kg:

Carbone = 505 g/kg

Oxygène = 310 g/kg

Azote = 100 g/kg

Hydrogène = 67 g/kg

A20) COMPOSITION APPROXIMATIVE DE LA SPIRULINE EN ELEMENTS NUTRITIONNELS
(Voir aussi **Erreur! Signet non défini.**)

Protéines = 65 % en poids (norme : >50)

Glucides = 15 % en poids

Minéraux = 7 % en poids (cendres totales : <10)

Lipides = 6 % en poids

Fibres = 2 % en poids

Eau = 5 % en poids (norme : <10)

Contenu énergétique = 5000 calories ou 20,9 kJ/ gramme sec.

D'après notices Flamant Vert :

VITAMINES

Béta-carotène = 1400 mg/kg = 2330 Unités Internationales (U.I.)

E (Tocophérol) = 100 mg/kg

B1 (Thiamine) = 35 mg/kg

B2 (Riboflavine) = 40 mg/kg

B3 ou PP (Niacine) = 140 mg/kg

B5 (Acide pantothénique) = 1 mg/kg

B8 ou H (Biotine) = 0,05 mg/kg

B12 (Cobalamine) = 3,2 mg/kg (cette B12 ne serait pas totalement assimilable par l'organisme)

Inositol = 640 mg/kg

K (Phylloquinone) = 20 mg/kg

ACIDES AMINES

Alanine = 47 g/kg

Arginine = 43 g/kg

Acide aspartique = 61 g/kg

Cystine = 6 g/kg

Acide glutamique = 91 g/kg

Glycine = 32 g/kg

Histidine = 10 g/kg

Isoleucine = 35 g/kg

Leucine = 54 g/kg

Lysine = 29 g/kg

Méthionine = 14 g/kg

Phénylalanine = 28 g/kg

Proline = 27 g/kg

Sérine =32 g/kg

Thréonine = 32 g/kg

Tryptophane = 9 g/kg

Tyrosine = 30 g/kg

Valine = 40 g/kg

PIGMENTS

Phycocyanine = 150 g/kg

Chlorophylle a = 11 g/kg

Caroténoïdes = 3,7 g/kg

(dont béta-carotène = 1,4 g/kg)

ACIDES GRAS ESSENTIELS

Acide linoléique = 8 g/kg

Acide gamma-linolénique (AGL ou GLA) = 10 g/kg

ENZYME

Superoxyde-dismutase = 1,5 millions d'unités / kg

MINERAUX

Chrome = 3 mg/kg

Calcium = 10000 mg/kg

Cuivre = 12 mg/kg

Fer = 1800 mg/kg

Magnésium = 4000 mg/kg

Manganèse = 50 mg/kg

Phosphore = 8000 mg/kg

Potassium = 14000 mg/kg

Sodium = 9000 mg/kg

Zinc = 30 mg/kg

A21) ELEMENTS DE PRIX DE REVIENT

(Prix en France TVA 20,6 % incluse et au détail sauf indication contraire)

(Ces prix sont exprimés en U.S. $ sur la base de 6 FF/U.S $ et correspondent à une époque où le prix du pétrole brut était de l'ordre de 20 $/barril)

(Les indications de fournisseurs n'ont aucun caractère d'exclusivité ni de publicité)

SOMMAIRE

Argile pure (densité 2,2 kg/l) = 0,5 $/kg

Films

- Polyéthylène noir, épaisseur 0,15 mm, largeur 3 m = 0,35 $/m² (Arequipa)

- Polyéthylène noir, épaisseur 0,15 mm, largeur 8 m = 0,3 $/m² par lot de 300 m² ou 1,17 $/m² au détail

- Polyéthylène noir, épaisseur 0,3 mm, largeur 6,5 m = 0,98 $/m² par lot de 400 m²

- EVA noir piscicole, épaisseur 0,5 mm, largeur 4, 6 ou 10 m, garanti 15 ans = 5,08 $/m² au détail

- PVC vert alimentaire, épaisseur 0,5 mm, largeur 4 ou 6 m, garanti 10 ans = 6,77 $/m² au détail

- PVC noir, épaisseur 0,5 mm, non alimentaire, largeur 2,05 m = 1,8 $/m² par lot important

- PVC noir, épaisseur 1,2 mm, alimentaire et soudable facilement = 6,67 $/m² en lot important

- PVC gris, épais. 1,2 mm, 1150 g/m², posé par entreprise = 4,5 $/m² (Espagne)

- Géomembrane en PP souple qualité eau potable), épaiss. 1,5 mm, posée par entreprise = 20 $/m²

- EPDM noir, épais. 1,14 mm, 1161g/m², en rouleau de 6,1 à 12,2 m de large = 10 $/m²

- Polyéthylène de serre (au Cd), épaisseur 0,2 mm, largeur 6,5 m = 2 $/m² au détail ou 0,8 $/m² par rouleau de 390 m² (78 kg)

- Polyéthylène de serre (au Cd), épaisseur 0,25 mm, largeur 4 m = 0,6 $/m² au détail (Pérou)

- Polyéthylène de serre (incolore), 200 µ, largeur 8 m, en rouleau de 3500 m² (713 kg) ou en rouleau de 400 m², largeur 6,5 m =) = 0,75 $/m²

- Toile cirée (qualité épaisse) = 8 $/m² au détail

Fournisseurs de films et bâches : Celloplast, Route du Préaux, F53340-Ballée, Tél 43984602 ou revendeurs (Mr Bricolage, Coopératives agricoles)

Géotextiles

- Bidim, 200 g/m², 4 m de large = 1,68 $/m² au détail

Fournisseurs : Matériaux pour le batiment

Couverture des bassins

- Fibre de verre-polyester, ondulée, largeur 0,9 m, longueur 2 m = 15,7 $/ m² ou 11,3 $/m² (Arequipa)

- verre à vitre 3 mm = 20 $/m²

- Tôle ondulée galvanisée, largeur 0,9 m, longueur 2,5 m = 9,3 $/m²

- Toiture traditionnelle africaine en chaume sur piquets et charpente bois traité = 8 $/m² couvert (Koudougou, Burkina Faso)

- Serres "chapelle" accolées, couvertes en film de polyéthylène anti-UV (tout installées, ordinateur et ombrage compris) = 16 à 23 $/m² utile couvert

Fournisseurs (serres) : Richel-Serres de France, Quartier de la Gare, F13810-Eygalières, www.richel.fr

Tôles

- Fibre de verre-polyester translucide plane, largeur 1 m = 12,3 $/m²

- Tôle galvanisée plane, épaisseur 0,5 mm, 1x2 m = 3,3 $/m²

Bois (sapin brut non traité)

- Planches en bois brut, épaisseur 27 mm, longueur 2,5 m = 5,8 $/m²

- Planches rabotées, épais. 14 mm, largeur 80 mm, long 2 m (en bois d'ayou) = 50 $/m² (Mr Bricolage)

- Liteaux en bois brut, 27 x 27 mm, long. 2 m = 0,3 $/m

- Liteaux en bois brut, 3 x 4 cm, long. 2 m = 0,5 $/m

- Liteaux en bois brut, 8mm x 27 mm, long 2,5 m = 0,27 $/m (Mr Bricolage)

- Chevrons en bois brut, 6 x 8 cm, longueur 5 m = 1,4 $/m

- Carrelet rabotés, 14 mm x 14 mm, long 2 m = 0,83 $/m (Mr Bricolage)

Piquets

- acier (en té) peints, long. 1 m. = 2,5 $/pièce

Tubes

- acier galvanisé 50 mm, en longueurs de 6 m = 3,5 $/m

Vis galvanisées

- 4x40 mm = 10 $/200 pièces

- 4 x 30 mm (tirefond) = 0,05 $ pièce

- 5 x 30 mm = 5 $/100 pièces

- 8x60 mm (tirefond) =0,17 $ pièce

- 8x100 mm (tirefond) = 0,23 $ pièce

- 8x120 mm (tirefond) = 0,30 $ pièce

- 8x140 mm (tirefond) = 0,55 $ pièce

Parpaings ("blocs-ciment" en Belgique) de 50 x 20 x 20 cm (livrés sur chantier) = 1 $/pièce

Sable (livré sur chantier) = 43 $/mètre cube

Filets d'ombrage

- Canisse, largeur 2 m = 3,5 $/m² ; 1 $/m² (Bangui, RCA) ; 1,2 $/m² (Cotonou)

- Ombrière ("Malla Rashel" = plastique tissé), noire, 80 %, largeur 4 m = 1,1 $/m² (Chili)

- Ombrière (plastique tissé), noire, 66 %, 50 m x 2,8 m = 1,45 $/m²

Fournisseurs : Celloplast, Route du Préaux, F53340-Ballée, Tél 43984602 ou revendeurs (Mr Bricolage, Coopératives agricoles)

Lampes horticoles (système complet avec ballast et réflecteur, ampoule Philips Son-T Agro garantie 10.000 heures, 13 W/klux/m²)

400 Watt = 300 $

Isolants

- flexible multicouche épaisseur 20 mm (équivalent à 200 mm de laine de roche), en rouleau de 1,58 m x 10 m = 15 $/m²

- rigide polystyrène extrudé en plaque de 4 cm d'épaisseur = 9 $/m²

Supports de toiles de filtre

-"Grille" Polyéthylène maille 5 mm NORTENE, largeur 1 m = 5,5 $/m² au détail

- Moustiquaire fibre de verre, largeur 0,6 ou 1 m = 6 $/m² au détail

- Moustiquaire nylon, largeur 1 m = 1,35 $/m² (Arequipa, Pérou)

- Filet nylon maille 10 mm = 3 $/m²

Filtres

- Toile de filtration Polyester monofilament, 30 microns, largeur 1,42 m. = 51,3 $/m²

- Toile de tamisage Polyester monofilament, 315 microns, largeur 1,58 m = 14,3 $/m²

- Toile de filtration Polyester (Tergal), tissu ordinaire pour doublure = 1,7 à 3,3 $/m²

- Cadre de sérigraphie, toile polyester monofilament 25 microns = 165 $/m²

Fournisseur de toiles de filtration (30 µ) :

Nom du fournisseur : SEFAR FYLTIS

Adresse : BP 3175 Lyon Cedex 03, France

tel 33 4 72 13 14 15

fax 33 4 04 72 13 14 00

Compte chèque postal : N° 7878 45 Y, Centre Lille

Référence de la toile 30 µ :

Référence article : 72556AC

Désignation : Largeur 1420 mm, longueur 4 mètres, 07-30 /21 / PETEX

Prix (le 21/01/2000) : 362 FF le mètre, plus 20,6 % de TVA (sauf pour l'export) + environ 4 % pour (assurance + transport + emballage).

Aspirateurs

- Aspirateur professionnel , 300 m. cube/h, 20 kPa, 1200 W = 1000 $

- Aspirateur ménager = 300 $

Pompes

- Pompe d'aquarium, 1000 l/h, 14 W, 220 V = 31 $

(*On trouve en Turquie des pompes valables à un prix très inférieur)*

- Pompe d'aquarium, 1200 l/h, 32 W, 220 V = 37 $

- Pompe vide-cave, à vortex, 16000 l/h,1 kW, 220 V = 182 $

- Pompe vide-cave, à vortex, 5000 à 12000 l/h, 300 à 400 W, 220 V = 100 $

- Pompe vide-cave ordinaire, 5000 l/h, 200 à 300 W, 220 V = 60 $

-Transformateur de sécurité pour pompes d'aquarium (à écran d'isolement relié à la terre), 500 W = 100 $

Fournisseurs (pompes d'aquarium Maxi-Jet) : Aquarium Systems 43 rue Gambetta, F57400-Sarrebourg, Tél 0387031098 ou magasins d'aquariophilie

Pressoirs

- Inox à vis supérieure, à jus de fruit, 4 litres = 190 $

Fournisseur : Etablissements J. Perraud, 7 route Nationale, F42470- Saint-Symphorien-de-Lay, Tel 0477647879

Robinets

- tout plastique, diamètre 25 mm = 30 $

Compteurs d'eau

- tout plastique, diamètre 38 mm = 350 $

Compresseurs d'air

- Type aquarium : 300 l/h, 6 Watt = 27 $

- Type aquarium : 150 l/h = 12 $

- Sans huile : 8 bars, 12000 l/h, 1100 Watt, réservoir 6 litres = 215 $

- Tuyau pour air comprimé 8 bars sur enrouleur, 20 m = 48 $

- Tuyau pour air comprimé 8 bars en ressort, 5 m = 20 $

- Tuyau PVC 4 mm pour aquarium = 0,53 $/m

- Distributeur à 3 robinets pour aquarium = 4,7 $

Programmateurs

- En 220 V alternatif = 20 à 28 $ (France et Chili)

- En 12 V continu = 120 $

Photovoltaïque

- Panneau Si monocristallin, 12 V, 22 W = 270 $

(+ Régulateur/chargeur de batterie = 100 $)

- 12 V, 15 AH, étanche = 50 $

- Convertisseurs de courant électrique de 12 V continu en 220 V

puissance 40 W = 120 $

puissance 100 W = 230 $

Motoréducteurs

- 180 W, 220 V = 251 $

- 30 t/mn, 100 W, 220 V = 240 $

- 20 t/mn, 80 W, 220 V = 208 $

- 20,8 t/mn, 10 W restitués, 220 V, moteur asynchrone (Réf Crouzet 80667-009-INV) = 230 $

Extrudeuses (Pistolets à extruder pour silicone en poches)

- manuel, capacité 300 ml, modèle SIKA = 37 $ (47 $ au Chili)

- manuel, capacité 300 ml, importé de Chine (*de bonne qualité)* = **3 $**

- manuel, capacité 600 ml, modèle SIKA MK5C = 49 $

- à air comprimé, 600 ml, modèle SIKA DKR600 = 267 $

- poussoir (pour faire les saucisses), inox, 10 litres, manuel = 500 $

- gaine PE alimentaire 60µ, diamètre 50 mm = 24 $/km

Fournisseurs (Pistolets Sika) : Sika, 101 rue de Tolbiac, F75654-Paris cedex13, Tel 0153797900 ou revendeurs (produits pour le batiment)

Séchoirs

- Séchoir électrique**,** puissance 600 Watt, modèle Stöckli avec 3 plateaux = 67 $ (Suisse) ; le plateau supplémentaire = 1,7 $

Fournisseurs : A. & J. Stoeckli, CH-8754- Netstal GL ou revendeurs (en Suisse)

Broyeurs

- broyeur manuel (Corona) = 20 $ (Chili)

Emballages

- Sacs plastique métallisés thermoscellables à maintien vertical ou non, capacité 800 g de spiruline broyée = 0,41 $ pièce par 5000 unités ou 0,34 $ pièce par 10.000 unités ; capacité 100 g = 0,078 $ pièce par 10.000 unités (non imprimés) ou 0,113 $ imprimés.

- soude-sacs électrique pour sacs plastique aluminisés = 333 $

Fournisseur : Bernhardt, BP 69, F62201-Boulogne/Mer, Tel 0321315091

Produits chimiques

- Acide chlorhydrique 33% = 1,17 $/litre

- Acide citrique en sac de 25 kg = 1,9 $/kg (Costa Rica)

- Acide phosphorique 78% en jerrican (24 % de P) = 0,6 $/kg (Espagne)

- Acide phosphorique 85 % en bidon de 25 kg (27 % P) = 1 $/kg (Costa Rica)

- Bicarbonate de sodium zootechnique en sac de 25 kg = 0,35 $/kg

- Bicarbonate de sodium naturel U.S.A. à 99,8 % de pureté,

en sac de 25 kg = 0,4 $/kg (Costa Rica)

- Bicarbonate de sodium alimentaire par 500 g = 2,7 $/kg

- Butane liquide = 1,3 $/kg en bouteilles de 13 kg consignées; 0,69 $/kg (Chili); 0,713 $/kg (Cotonou) + consigne

- Carbonate de sodium technique léger = 1 $/kg

- Chlorure de sodium brut broyé en sac de 50 kg = 0,22 $/kg;

0,083 $/kg (Arequipa), 0,117 (Espagne)

- Chlorure de sodium alimentaire (sel fin) en sac de 50 kg = 0,27 $/kg

- Chlorure de sodium alimentaire (sel fin) en sac de 10 kg = 0,38 $/kg

- EDTA sel disodique, 2H2O, par 1 kg = 50 $/kg

- Ferfol (Fer chélaté à l'EDTA à 13 % de fer), par 1 kg = 25 $/kg

- Gaz carbonique liquide en bouteille de 30 kg =

0,863 $/kg (Iquique, Chili) bouteille comprise,

ou 0,63 $/kg (Arequipa, Pérou) + bouteille (2 $/mois + caution 233 $)

- Gaz carbonique liquide en bouteille de 22 kg =

3 $/kg (Alès, France) + bouteille (8,8 $/mois + caution 200 $)

- Gaz carbonique liquide en bouteille de 25 kg (Chili) =

1,25 $/kg + bouteille (5,8 $/mois) [Détendeur = 12 $]

- Gaz carbonique liquide en vrac, avec stockage et annexes louées, pour 6 tonnes/an

= 0,5 $/kg

- Nitrate de potasse cristallisé, engrais, en sac de 50 kg = 0,68 $/kg

- Nitrate de soude du Chili, engrais à 16 % d'azote, en sac de 50 kg =

0,53 $/kg

- Oligoéléments en solution concentrée (formule J. Falquet) = 0,033 $/kg de spiruline

- Propane liquide vrac = 0,5 $/kg

- Phosphate monoammonique cristallisé, engrais, en sac de 25 kg

= 1,05 $/kg

- Phosphate dipotassique technique en sac de 25 kg = 3,58 $/kg

- Séquestrène 100 SG (Fer chélaté à l'EDDHA à 6 % de fer), par 1 kg =

42,5 $/kg

- Soude anhydre en boite de 1,3 kg = 3,33 $/kg, en sac de 25 kg = 1,63 $/kg

- Sucre blanc en sac de 1 kg = 1 $/kg (1,17 à Bangui)

- Sucre roux cristallisé en sac de 50 kg = 0,35 $/kg (Arequipa)

- Sulfate dipotassique cristallisé en sac de 25 kg = 0,48 $/kg

ou en sac de 5 kg = 2,3 $/kg

- Sulfate de magnésium cristallisé, engrais, en sac de 25 kg = 0,32 $/kg

- Sulfate de fer pour analyses ($FeSO_4$, $7H_2O$), flacon de 1 kg = 35 $/kg

- Sulfate de zinc ($ZnSO_4$, $7H_2O$) pour analyses, flacon de 1kg = 25 $/kg

- Urée = urée en perles, agricole, en sac de 50 kg = 0,25 $/kg;

0,28 $/kg (Espagne), 0,27 $/kg (Arequipa)

Matériel de laboratoire

- Bassine en PE alimentaire blanc, 35 litres = 28 $

- Balance électronique 5 kg = 50 $

- Balance électronique 100 g (à 0,1 g) = 167 $

- Microscope monoculaire = 142 à 333 $

- Microscope portable (x 100) = 50 $

- Densimètre = 17 à 29 $

- Thermomètre à alcool = 3 à 17 $

- Thermomètre à Infra-Rouge (mesure sans contact) = 50 $

- Thermomètre-humidimètre électronique = 25 à 98 $

- pHmètre professionnel = 400 à 580 $ (dont électrode 60 à 100 $)

- ph-mètre-thermomètre = 277 $

- ph-mètre "Piccolo" = 154 $

- pHmètre simplifié (type "stylo") = 58 $

- Etalons de pH 4 -7-10 (60 ampoules) = 100 $

- Etalons de pH 4 - 7 - 10 (15 gélules ou "pillows") = 22 $

- Aquamerck ammonium 0,5 - 10 ppm (150 dosages) = 64 $

- Bandelettes Merckoquant nitrates (100 dosages) = 50 $

- Bandelettes Merckoquant sulfates (100 dosages) = 37 $

- Bandelettes Merckoquant calcium + magnésium (100 dosages) = 37 $

- Bandelettes Merckoquant calcium 10 - 100 ppm (60 dosages) = 69 $

- Analyseur de CO2 dans l'air, I.R. = 400 $

Analyses, $/unité

- % protéines = 15

- % humidité = 7,8

- % cendres brutes = 6,7

- % GLA = 97

- Phosphore total = 18,3

- Nitrates = 24,7

- Fer = 26,2

- Autres métaux = 20 (moyenne)

- Béta-carotène = 100

- Microbiologie = 64

Ensembles

- Bassin de culture sous serre tunnel avec roue à aube (1000 m²) = 25 $/m²

- Serre en film PE sur armature acier (1000 m²)

type tunnel = 7 $/m²

type multichapelle aérable et ombrée = 19 $/m²

Spiruline sèche (Prix de vente)

- Le prix de vente de la spiruline sèche est extrêmement variable selon les lieux, les quantités, la qualité, l'emballage, la conjoncture, etc. En 1999 le prix international par tonne est tombé autour de 10 $/kg sous la pression chinoise. Au détail on trouve de la spiruline en poudre autour de 80 $/kg, tandis qu'en gélules elle se vend en pharmacie autour de 300 $/kg.

Frêt

- par avion, de Madagascar en France = 3,33 $/kg

A22) PLANCHE POUR COMPARER LES SPIRULINES A D'AUTRES ALGUES :

Spiruline droite

Chlorelle

Oocystis

Oscillatoria articulata

grunowiana tenuis

indentations

(Toxique)

Anabaena flos-aquae

Anabaena

(Toxique)

hétérocystes

Microcystis

(Toxique)

Anabaenopsis arnoldii

A23) SPIRULINE VUE AU MICROSCOPE



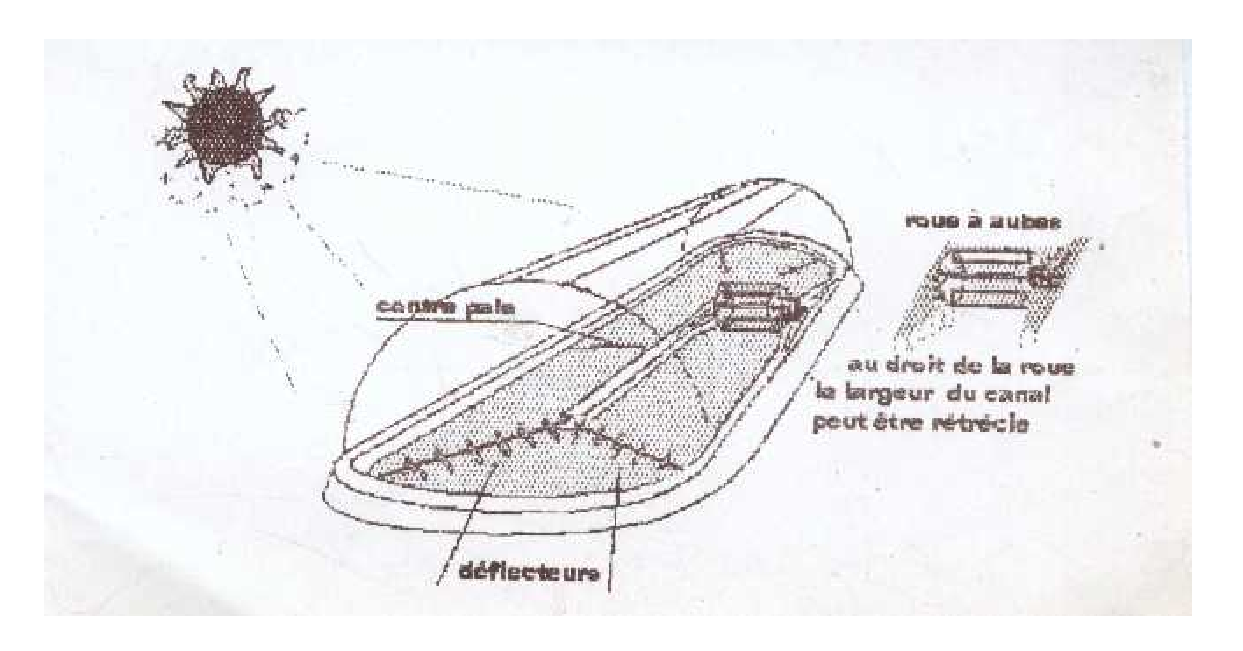
Le poids sec d'un filament moyen de spiruline est d'environ 3µg.

Dans l'hémisphère Nord comme dans le Sud, le sens d'enroulement des spires des spirulines spiralées est le même: dans le sens des aiguilles d'une montre si on regarde par dessus la spirale

en descendant:

A24) POUR CEUX QUI ONT DE L'ELECTRICITE:

A24.1) AGITATION PAR ROUE A AUBES



Les bassins agités par roue à aubes sont plus longs que larges, avec extrémités arrondies et une cloison centrale et de préférence des déflecteurs aux changements de direction dans les angles. La roue à aube est installée sur un des côtés ou à une extrémité, entre bord et cloison centrale. L'axe de rotation repose sur deux roulements à billes fixés sur des supports solides, généralement bétonnés. Au droit de la roue la largeur du canal peut être rétrécie sans inconvénient; au contraire cela permet de renforcer les supports et de raccourcir la roue donc de la rendre plus solide.

La roue comprend par exemple 4 ou 6 pales ou ailettes solidement maintenues sur des disques solidaires de l'axe et de diamètre voisin de 80 cm. La hauteur des pales est de l'ordre de 20 cm. Pour minimiser les dégâts causés aux spirulines, il est bon d'arrondir le bord d'attaque des pales. La construction de la roue à aubes doit se faire de préférence en plastique (PVC rigide d'épaisseur 4 mmm ou plus) ou en bois car presque tous les métaux sont corrodés à la longue. Le contreplaqué de qualité résistant à l'eau bouillante convient et il est pratique. L'acier galvanisé et certains inox (304) résistent en général. L'axe est généralement métallique, mais il faut prévoir son remplacement ainsi que celui des roulements à billes qui le supportent et qui risquent fort d'être corrodés. Un moto-réducteur électrique entraîne l'axe à une vitesse de 20 tours par minute environ. Sa puissance utile doit être de l'ordre de 1 Watt/m² de bassin ou plus ; sous serre, prévoir une arrivée d'air extérieur sur le ventilateur du moteur. Un variateur de vitesse est commode mais onéreux. Une transmission par courroie est recommandée. Pour les petits bassins, la roue à aubes peut être montée directement sur l'axe du moto réducteur. Elle peut ne comporter que deux pales, ce qui a pour effet de provoquer une houle artificielle se propageant jusqu'à l'extrémité du bassin et contribuant à l'agitation. Il est utile de protéger le fond du bassin, s'il est en film plastique, au droit des pales: par exemple par des plaques inox ou ciment (on peut couler du ciment sur place). La distance entre le bas des pales et le fond du bassin ou ces plaques doit être faible, mais suffisante pour ne pas risquer de toucher le fond ni d'endommager les spirulines (5 cm paraît correct).

On admet que la vitesse de circulation de la culture doit être de 20 cm/seconde pour obtenir une bonne agitation; théoriquement le régime turbulent est atteint dès que cette vitesse dépasse 10/z (z = profondeur en cm) si la concentration en spiruline est inférieure à 3 g/l. Pour réduire les irrégularités de débits et l'accumulation des boues en certains endroits, on installe des déflecteurs ou des contre-pales créant des remous :

Il y a un débat concernant le meilleur sens de rotation du liquide dans le bassin : pour certains le meilleur serait le sens contraire aux aiguilles d'une montre. Pour d'autres le sens des aiguilles d'une montre serait tabou. En ce qui nous concerne, nous n'avons aucune recommandation spéciale.

A24.2) FILTRATION SOUS VIDE

L'utilisation d'un vide modéré (un aspirateur donnant un vide de 15 kPa - soit 1,5 m de colonne d'eau - suffit) permet d'accélérer la vitesse de filtration. On utilise pour cela une toile reposant sur un support rigide (grille), posé sur un réservoir étanche résistant au vide. Ce réservoir est relié à l'aspirateur. La culture à filtrer est pompée dans le bassin à travers une crépine servant de tamis ou envoyée sur la toile de filtration à travers un tamis. Une pompe vide-cave de type "à vortex" est recommandée pour ne pas casser trop de spirulines. Une pompe type vide-cave, à commande automatique par flotteur et munie sur son refoulement d'un clapet de non-retour bien étanche, assure le maintien automatique du niveau de filtrat dans le réservoir sous vide.

En cours de filtration on décolmate au besoin la toile avec une raclette caoutchouc. On arrête l'arrivée de liquide et on attend que la biomasse soit suffisamment pauvre en eau, puis on récupère la biomasse à la raclette.

La vitesse de filtration dépend bien entendu de la qualité de la culture et de la fréquence des décolmatages, mais elle peut se situer autour de 8 kg de spiruline sèche/heure/m² de filtre.

A24.3) FILTRATION SOUS PRESSION

La culture pompée à travers un tamis peut être envoyée dans un sac en forme de manche fermé par une pince, flottant dans le bassin. Si le sac est vertical et hors de la culture, de petit diamètre (< 6 cm) et de grande longueur (> un mètre), la filtration peut se faire par gravité avec une bonne efficacité.

A24.4) FILTRATION CONTINUE

Divers dispositifs existent (tamis vibrants, tambours rotatifs), mais sont plus adaptés aux conditions industrielles qu'artisanales.

A24.5) ESSORAGE PAR LE VIDE (pour remplacer le pressage)

Il s'agit d'une variante du § A24.2. Si la biomasse est laissée sur le filtre sous vide suffisamment longtemps (par exemple 10 minutes pour une épaisseur de 5 mm), l'eau interstitielle s'élimine comme dans le cas d'un pressage. Par rapport au pressage, ce système permet le lavage éventuel de la biomasse (opération que nous estimons inutile, voire nuisible selon les cas, cf § 8.2 RECOLTE.htm - lavage).

On peut aussi n'utiliser le filtre à vide que pour l'essorage; dans ce cas le volume de liquide est suffisamment faible pour qu'on puisse se passer de la pompe vide-cave dans le réservoir.

Un bon essorage peut exiger un vide plus fort que la simple filtration.

A24.6) ESSORAGE PAR ESSOREUSE (pour remplacer le pressage)

L'essorage de la biomasse sortant du filtre peut aussi se faire dans une essoreuse à panier (à axe vertical) munie d'une toile de filtre et tournant à vitesse suffisamment modérée pour ne pas casser la spiruline. Ce système permet aussi le lavage de la biomasse. Nous ne le considérons pas à la portée d'un artisan.

A25.7) ESSORAGE PAR GAZ COMPRIME (pour remplacer le pressage)

C'est une variante du § A25.5 oùle vide est remplacé par une pression de gaz pouvant aller jusqu'à 5 bars sans risquer de casser la spiruline si la biomasse est de qualité correcte.

A25) HIVERNAGE

Dans les zones à hivers froids, les récoltes peuvent se poursuivre tant que la température maximum ne descend pas en dessous de 15° C. Ensuite, lorsque la température des bassins est inférieure à 10° C, il arrive que la spiruline décante au fond et jaunisse. Il faut éviter d'aborder l'hiver à pH < 10 et de trop agiter à la pompe pendant l'hiver pour éviter le risque de "blanchiment" du milieu et la mort des spirulines.

Si l'hiver est assez doux (> - 8° C) et si le milieu n'est pas carencé, la spiruline peut très bien survivre sous serre et redémarrer aux beaux jours, mais il est prudent d'ombrer tant que la température du bassin reste inférieure à 10 - 15° C. En cours d'hiver il est bon d'agiter de temps à autre au balai pour remettre en suspension et aérer les boues du fond. En fin d'hiver, si tout se passe bien, le milieu de culture se trouve rénové (turbidité très faible, peu ou pas de boues, pH = 10, récoltabilité excellente). Cependant il y a le danger théorique que pendant l'hiver des contaminations puissent se produire (algues étrangères et éventuellement toxiques): faire un test de toxicité avant de recommencer à récolter.

Dans les zones à forte saison des pluies il faut couvrir les bassins. Si ce n'est pas possible, on peut continuer les récoltes en purgeant le milieu de culture, et en rajoutant les sels correspondants, mais cela coûte cher en sels tandis que la récolte risque de ne pas pouvoir se sécher. On peut donc préférer arrêter la production, puis vider et nettoyer à fond les bassins et redémarrer la culture au retour du beau temps.

Il faut toujours conserver une ou plusieurs réserves de semence de bonne qualité, mais a fortiori en cas d'arrêt annuel. La réserve doit être conservée dans un endroit abrité des intempéries, à l'ombre (pas à l'obscurité pendant le jour), à température modérée (20 à 30 ° C) et agitée de temps en temps. Elle ne doit être ni trop concentrée ni trop diluée en spiruline (Secchi = 2 à 4 convient). Il faut "repiquer" la culture de réserve, c'est-à-dire démarrer une autre réserve, ensemencée à partir de la première tous les deux à trois mois pour maintenir sa qualité. Nota: une culture, même de réserve, ne doit jamais être fermée de manière étanche: elle a besoin d'air, et un bon moyen de l'apporter est d'agiter par bullage d'air.

En cas d'arrêt prolongé des récoltes sur un bassin en production, il faut l'ombrer en permanence et l'agiter au moins de temps en temps.

A26) FORMULES D'OLIGO-ELEMENTS

A26-1) Formule de Jacques Falquet, 1997 (Antenna Technologie, Genève) :

Solution concentrée pour faciliter le transport (5 ml contiennent les oligo-éléments d'un kg de spiruline) :

Acide citrique = 100 g / litre

Borax = 75 g / litre

MnNO3,4 H2O = 45,6 g / litre

ZnSO4,7H2O = 35 g / litre

CuNO3,3H2O = 9,2 g / litre

KCr(SO4)2,12 H2O (alum de chrome) = 5,4 g / litre

MoNa2O4,2H2O (Molybdate de sodium) = 3,5 g / litre

Co(NO3)2,6H2O = 0,2 g / litre

Ni(NO3)2,6H2O = 2,9 g / litre

NH4VO3 (monovanadate d'ammonium) = 0,94 g / litre

Na2Se2O3,H2O (sélénite de sodium) = 0,2 g / litre

Eau distillée = qsp 1 litre

A noter qu'en vieillissant cette solution dégage une odeur nauséabonde de gaz sulfuré (composé du sélénium volatil et toxique).

A26-2) Formule de J.P. Jourdan (sans sélénium, avec supplément de zinc)

$ZnSO_4,7H_2O$ = 20 g / litre

Sel disodique d'EDTA,$2H_2O$ = 7 g / litre

Acide orthoborique = 5 g / litre

$MnCl_2,4H_2O$ = 2 g / litre

$CuSO_4,5H_2O$ = 0,5 g / litre

Alum de chrome = $KCr(SO_4)_2,12\ H_2O$ = 0,3 g / litre

MoO_3 (oxyde molybdène) = 0,1

Eau déminéralisée ou de faible dureté = qsp 1 litre

L'oxyde de molybdène doit de préférence être dissout dans l'eau avant emploi, mais il peut être remplacé par le molybdate de sodium ($MoNa_2O_4$, 2 H_2O) à raison de 0,18 g/l.

La couleur de la solution est bleue.

Dose moyenne à utiliser = 25 à 100 ml/kg récolté, selon les autres apports d'oligoéléments; si on ne connaît pas ces autres apports, essayer 50 ml/kg et chercher la meilleure dose par tâtonnements. La dose de 100 ml/kg apporte 500 mg de zinc/kg, ce qui considéré comme souhaitable du point de vue nutritionnel.

A la dose de 50 ml/kg le coût de cette formule est négligeable: environ 0,03 $/kg de spiruline.

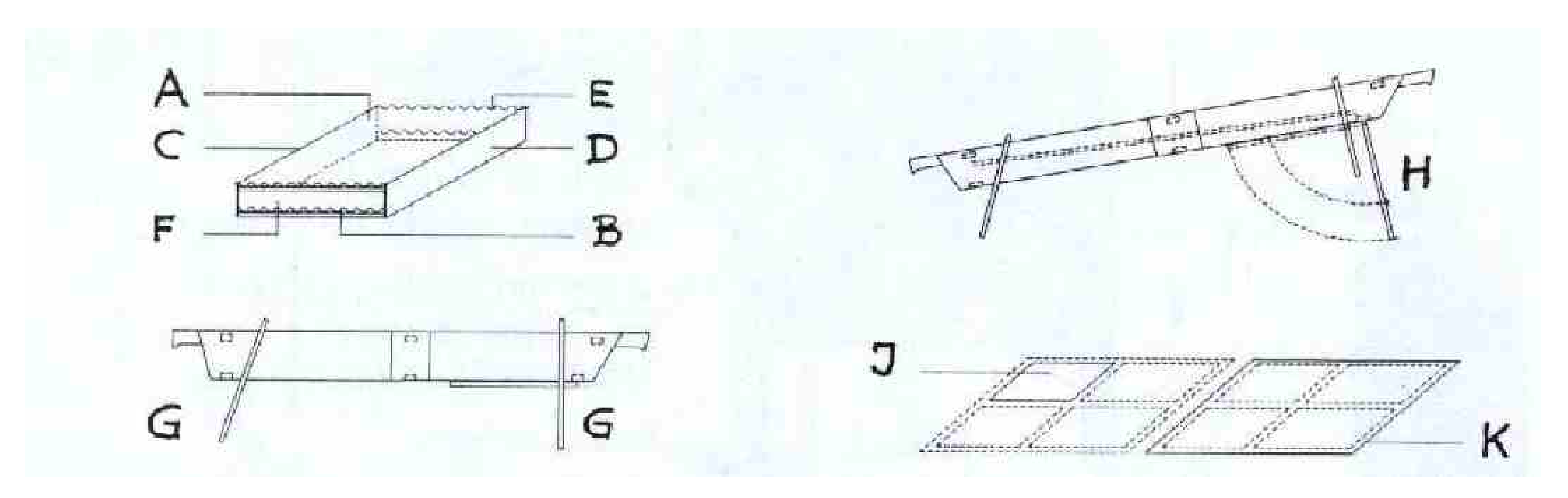
Remarque

La composition de la spiruline peut être modifiée dans de larges proportions concernant le fer et les oligoéléments selon ce que les spécialistes préconisent. Certains disent par exemple qu'il y a trop de vitamine B12 dans la spiruline : l'apport de cobalt a donc été supprimé dans la formule. Par contre la dose de zinc a été renforcée.

A27) PLANS DE SECHOIRS

A27.1) Séchoir solaire modèle "Bangui" (version SS4-I.1996) par Michel-André THELER, CH-1958 Uvrier/Sion (Suisse), Tél. (41) 27 203 28 43

Plan simplifié (Monsieur Theler dispose des plans complets) :



Description sommaire de l'élément et principe de fonctionnement :

Caisse (dimensions 200 x 90 x 25 cm) constituée de :

- Une tôle ondulée A en polyester translucide (dessus)
- Une tôle ondulée B en aluminium (fond)
- Deux côtés C et D (contre-plaqué)
- Un portillon frontal de chargement E (moustiquaire)
- Une fenêtre F (moustiquaire) à l'extrémité opposée

Cette caisse repose sur 4 pieds fixes G (à l'état de repos et lors du chargement) ou elle est inclinée afin d'optimiser l'exposition au soleil et l'effet thermosiphon (surélévation de l'arrière par un double pied escamotable H).

Séchage par circulation d'air chaud au travers de 8 cadres J en moustiquaire plastique (surface utile totale = 1,2 m²) sur lesquels est disposée la biomasse extrudée à sécher.

Chargement à l'aide de 2 châssis K (supportant chacun 4 cadres) introduits lorsque le portillon est ouvert et glissant à l'intérieur du caisson en prenant appui sur deux rails latéraux inclinés.

Productivité par bon ensoleillement : environ 300 g de spiruline sèche/jour.

A27.2) Séchoir solaire à gaz (modèle "Davougon", version 1996) par Pierre ANCEL,

F-95120 Ermont, Tél. 01 30 72 03 57

Cet appareil est construit à partir d'un fût en tôle de 200 litres (diamètre environ 50 cm, hauteur environ 80 cm) propre auquel trois pieds support on été soudés ou boulonnés. A 10 cm au dessus du fond des ouvertures colmatables, protégées par des morceaux de moustiquaire collés, sont aménagées pour permettre l'entrée d'air frais et la régulation de température.

A 20 cm au dessus du fond des cornières métalliques sont soudées ou vissées pour servir de support aux plateaux de séchage. Un couvercle amovible en bois ou en métal protège de la pluie et des insectes tout en permettant la sortie de l'air humide.

Les plateaux sont des cadres en bois munis d'une moustiquaire nylon. Ils sont emplilables (nombre maximum = 5)

Un réchaud à gaz butane (ou un brûleur récupéré sur une gazinière, monté sur support métallique soudé) permet de chauffer le fond du séchoir.

Le séchage peut aussi se faire directement par les gaz de combustion, convenablement dilués pour régler leur température (en jouant sur la hauteur des plateaux par rapport au brûleur), mais à deux conditions:

- brûleur de bonne qualité (ne charbonnant pas et donnant une flamme bleue)

- gaz de bonne qualité (le gaz butane courant en France convient)

A27.3) Séchoir solaire à chauffage indirect, conception Claude VILLARD, 8 rue Stéphen Liégeard, F-83400- Hyères, Fax 04.94.57.03.34, spirulinaP@aol.com

Le séchoir est constitué d'un caisson en tôle noire mate portant 5 plateaux amovible (cadre bois + moustiquaire nylon), muni sur un côté de portes permettant le chargement des plateaux. Le caisson est surélevé (pieds ou dénivellée du sol) de manière à pouvoir être alimenté en air chaud par thermosiphon à partir d'un capteur solaire à air à absorbeur en briques cuites, incliné et orienté convenablement selon la latitude du lieu. L'entrée d'air au capteur constitue le point bas du système et elle est protégée par une moustiquaire ; cette entrée doit être placée en un endroit autant que possible à l'abri des poussières et autres polluants, et bien évidemment hors d'eau..

Le caisson est surmonté d'une large cheminée également en tôle noire mate, surmontée d'un chapeau de protection contre la pluie et portant une moustiquaire de protection contre les insectes et feuilles mortes. Cette cheminée assure un tirage suffisant : pour cela sa hauteur doit être proche de celle du caisson.

A28) PROJET SEMI-ARTISANAL DE 5 KG/JOUR

Il nous parait intéressant de résumer ici un projet de 5 kg de spiruline/jour que nous avons eu l'occasion de préparer ; il s'adresse à des groupes disposant d'électricité, d'eau courante et de CO_2, et disposés à investir suffisamment pour vendre leur production sur le marché international. En climat chaud l'atelier peut fonctionner toute l'année et produire 1,5 tonnes/an ; en climat tempéré, la moitié. Il s'agit encore d'un procédé peu mécanisé, utilisant beaucoup de main d'œuvre.

A28.1) Bassins

4 bassins de 3 m x 50 m = 150 m² , sous 2 serres de 8 m de large, à raison de 2 bassins par serre, avec une allée au centre de la serre entre les deux bassins. Agitation par roue à aubes à 4 ou 6 pales bois actionnée par motoréducteur de 250 W vitesse 6 t/m (un par bassin). Puisard de vidange à une extrêmité, vidange par gravité ou par pompe vide-cave à vortex. Serres aérables et ombrables partiellement, munies de moustiquaires aux deux bouts.

En variante la serre peut être remplacée par un habillage de film tendu sur chaque bassin, prenant appui sur un tube galvanisé reposant sur le muret central. Les bords du film sont enterrés. Dans cette variante l'accès au bassin est limité.

A28.2) Bâtiment

Toutes les manipulations de spiruline se font dans un bâtiment de 70 m² (pouvant servir de logement au personnel) dont le sous-sol est aménagé en salle de récolte. Au rez-de-chaussée se trouve le séchage-broyage-conditionnement du produit sec, ainsi qu'un petit laboratoire et le magasin de matières premières.

Le bâtiment est climatisé, avec ventilation par air filtré. Ceci facilite le port des vêtements de protection en vigueur dans les industries alimentaires.

La moitié du toit est construit pour pouvoir servir de capteur solaire sans vitrage (tôle peinte couleur tuiles) pour alimenter le séchoir solaire éventuel.

Un auvent abrite ventilateurs, séchoir, aspirateur, compresseur et cuve de carbonatation.

A28.3) Récolte

Le dispositif de récolte est constitué d'une cuve de filtration en ciment, profonde de 60 cm, large de 80 cm et longue de 8 m., aux bords horizontaux garnis d'un joint de caoutchouc, sur lesquels reposent 4 cadres de filtration mobiles. Ces cadres ont des bords de 10 cm de haut et un filet tendu sur le fond. Les toiles de filtration sont simplement posées sur ces cadres. La culture à filtrer vient des bassins par gravité à travers un tamis. Chaque bassin a sa propre tuyauterie d'amenée, munie d'un compteur d'eau permettant de savoir exactement le volume soutiré par bassin. On peut accélérer la filtration en branchant un aspirateur sur la cuve.

Le filtrat est pompé par une pompe vide-cave commandée par flotteur, située dans un regard au point bas de la cuve. La tuyauterie de refoulement, comprenant un clapet anti-retour, traverse le côté de la cuve pour ne pas interférer avec l'étanchéité au vide. Le filtrat est envoyé dans la cuve de carbonatation.

La biomasse égouttée est essorée dans une presse située à proximité de la filtration. Le pressage se fait sur des plateaux à rebords de 2 cm, au fond percé (formant caillebotis). Ces plateaux sont mobiles. La biomasse est enveloppée dans une toile de coton forte doublée à l'intérieur d'une toile nylon fine, formant un "paquet" plat de 5 cm d'épaisseur maximum posé sur un des plateaux, en attendant d'être mise sous presse. Plusieurs plateaux peuvent être empilés

pour pressage simultané. La presse peut être à vis ou à poids avec bras de levier.

La biomasse pressée est chargée dans une machine à faire les saucisses (un "poussoir") et mise en boyau plastique alimentaire de 50 mm de diamètre. Des noeuds en ficelle délimitent la longueur des saucisses qui correspond à celle du pistolet extrudeur (environ 35 cm). Les chapelets de saucisses sont mises au frigo au fur et à mesure de leur fabrication. Une partie de la production peut être sous forme de saucisses plus courtes pour la vente fraiche.

Le matériel et le sol sont lavés à l'eau après usage, l'eau étant recueillie dans un puisard au point bas du sous-sol et envoyée à l'égoût par un vide-cave à commande par flotteur.

A28.5) Nourriture de la spiruline

A la fin de la récolte on utilise la cuve de filtration pour transférer les sels (pesés au magasin situé juste au-dessus et transférés à la cuve par une chute en PVC) dans la cuve de carbonatation, en utilisant un jet d'eau et la pompe.

Cette cuve en ciment, de 4 m² de section et 3 m de profondeur, surélevée de 1 m. au dessus du sol, est reliée à un tube translucide permettant de connaître le niveau de liquide. Elle est aussi munie de bulleurs permettant l'injection de CO_2 au fond. L'injection de CO_2 (7 kg/jour) se fait de manière qu'aucune bulle ne sorte en surface (une échelle permet de surveiller cette surface). La durée d'injection peut être de plusieurs heures. Le fait que le CO_2 soit dissout en l'absence de lumière favorise le rendement d'absorption, proche de 100 %, en raison de l'absence de dégagement d'oxygène. Le bullage permet aussi de terminer la dissolution des sels et d'homogénéiser la solution.

On arrête la carbonatation quand le pH désiré est atteint (généralement 9,5), et on procède ensuite à la répartition de la solution dans les bassins au prorata du milieu soutiré pour la filtration. Le transfert se fait par gravité.

A28.6) Séchage

Pour l'extrusion on utilise un pistolet à colle en poches type Sika ("saucisson" en langage Sika Canada) de 600 ml de capacité, actionné par air comprimé. Le chargement du pistolet est instantané grâce au conditionnement de la biomasse en saucisses identiques aux poches de colle.

La méthode la plus simple, et sans doute la moins chère en investissements, consiste à utiliser les séchoirs électriques Stoeckli; il en faut une douzaine pour sécher les 5 kg/jour, avec une fournée de nuit. Le séchage en étuve électrique demande un peu moins de travail parce que les plateaux sont plus grands. L'étuve peut être couplée à un capteur solaire (en toiture) ou à un déshumidificateur pour économiser l'électricité. Dans ce dernier cas, particulièrement adapté aux climats chauds et humides, le matériel ne doit pas être isolé thermiquement et l'air en circulation doit être refroidi en dessous de 35° C.

Les spaghetti secs sont versés dans un récipient intermédiaire de 100 litres à travers un entonnoir de dimension adaptée à celle des plateaux. Ils sont écrasés au pilon puis broyés et

ensachés. Les emballages sont scellés sous vide par une machine du type utilisé pour emballer le fromage en Suisse.

A28.7) Personnel

Ce type de production semi-artisanale convient particulièrement à un couple résidant sur place; il n'y a alors normalement pas besoin de main d'oeuvre extérieure s'il est considéré comme acceptable de réduire la production en cas de maladie ou de congés.

Avec du personnel extérieur salarié, et pour assurer la production nominale tous les jours, il faut au minimum 3 personnes et de préférence 4.

A28.8) Prix de revient

Le programme de calcul (cf AnnexeA31) ne s'applique pas à ce type de projet semi-artisanal.

On peut toutefois l'utiliser comme une première approche, à condition d'ajouter à l'investissement environ 8000 $, ce qui porterait le prix de revient dans des conditions "africaines" à environ 15 $/kg.

A28.9) Conditions humaines pour la réussite du projet

Quelles conditions humaines faut-il réunir pour qu'un petit projet de spiruline réussisse?

1) Il faut qu'une demande solvable de spiruline se soit exprimée dès avant l'initiation du projet, et que le projet ait des perspectives de développement ultérieur, suite à des tests nutritionnels publiés et reconnus, et éventuellement à une campagne de publicité.

2) Il faut que le partenaire local désire fortement le projet et se comporte en vrai "patron", disposant des pouvoirs et des moyens voulus ainsi que du temps matériel pour s'occuper du projet. Il serait bon qu'il visite un projet de spiruline voisin pour qu'il voit bien de quoi il s'agit. Il est très souhaitable qu'il exprime par écrit ses objectifs tant vis-à-vis de ses collaborateurs que de l'ONG soutenant le projet.

3) Il ne faut pas que ce "patron" soit muté ailleurs en cours de projet.

4) Il faut que le responsable technique à former soit capable de comprendre l'intérêt du projet et s'y implique fortement. Pour cela il doit être salarié et assuré correctement (pas "au noir") et travailler à plein temps sur le projet. Il ne doit pas être paresseux. Il doit mettre la main à la pâte, fabriquer ses outils de récolte, former lui-même son équipe et veiller à ce qu'il y ait un bon esprit d'équipe. Il doit être convaincu de l'intérêt à long terme de son nouveau métier d'algoculteur. Il doit aimer manger lui-même de la spiruline et accepter de goûter sa production pour en vérifier la qualité organoleptique. Il faut qu'il soit convaincu de la nécessité de travailler hygiéniquement. Il doit être au courant des prix.

5) Il est important que le responsable fasse lui-même quelques découvertes, ou ait l'impression d'en faire. Il faut donc lui laisser rapidement une certaine autonomie et des moyens (petit labo),

tout en l'empêchant de sortir des limites prévues pour le projet (rester réaliste).

6) Il faut de bons moyens de communication avec l'ONG soutenant le projet (au moins fax), et la volonté de s'en servir, et ceci dans les deux sens (équipe locale-ONG et ONG-équipe locale).

7) Il faut que le projet soit raisonnablement protégé des vols et des insurrections.

8) Il faut interdire l'accès du projet à toute personne non autorisée, car l'expérience montre que les bassins sont souvent confondus avec des poubelles (exemples de Nanoro au Burkina et Dapaong au Togo).

9) Le personnel doit accepter de

- venir très tôt le matin pour faire les récoltes,

- assurer une permanence à midi si l'agitation n'est pas automatique.

Il est souhaitable qu'un membre de l'équipe habite sur place.

10) Il faut que des visiteurs de marque viennent voir le projet, mais pas trop souvent.

A29) CHECK- LIST POUR DEMARRAGE DE SPIRULINE SUR NOUVEAU SITE

(N.B. Le maximum devra être trouvé sur place ; le reste devra être apporté)

Film PE de serre épaisseur 0,2 mm (pour bassin extensible)

Récipients genre "Tupperware" (pour test d'humidité et stockage de biomasse fraîche)

Bassines (blanches de préférence) dont une à bords droits

Seau plastique (blanc de préférence et gradué)

Balai plastique

Jarre graduée plastique de 1 litre

Etiquettes autocollantes

Papier filtre type filtre à café Mellita N° 4

Entonnoir plastique

Pelle plastique à bord droit

Secchi

Sachets de sels pour 8 litres de milieu de culture initial

Kit d'analyse d'eau Merck (nitrate, sulfate, ammonium, calcium, dureté)

Balances électroniques 100 g (à 0,1 g) et 3 kg

Petits récipients plastique pour pesées

Seringues, compte-gouttes

Fonds d'évier plastique (pour presse)

Papier absorbant type Sopalin

Thermomètre (0 - 100° C), densimètre (1000 - 1050 g/l)

PHmètre avec une électrode de rechange

Etalons de pH 7 et 10 en gélules

Hygromètre digital

Piles de rechange

Pissette

Compresseur et pompes d'aquarium

Pompe vide-cave

Bidons plastique pour cultures labo, lampe de chevet 40 Watt

Tube souple diamètre 4 mm pour air + té avec robinets

Tube souple diamètre 10 mm pour pompe

Tuyau d'arrosage avec embout à jet réglable

Programmateur et prises multiples

Mètre de poche

Loupe (x25) ou microscope (x100)

Cystes (oeufs) d'Artémias et miniaquarium pour tests de toxicité

Tissus de filtration 30 µ en polyester

Tissus 315 µ en polyester

Grille plastique pour cadres de filtration

Extrudeuse

Séchoir électrique ou de quoi construire un séchoir solaire (moustiquaire, film plastique noir, ventilateur)

Sachets thermoscellables pour emballage spiruline

Kit de réparation de bâches plastique

Agrafeuse et agrafes

Outils de base (scie, tournevis, marteau, ciseaux) + clous, vis

Lampe de poche

Souche de spiruline 100 % spiralée ou ondulée

Manuel de culture artisanale (livre et diskette)

Bicarbonate

Sel de cuisine

Urée

Nitrate soluble

Phosphate soluble

Sulfate de magnésium

Sulfate de potassium

Sel de calcium soluble ou chaux

Oligoéléments

Ferfol ou Fetrilon (fer chélaté) ou acide citrique ou jus de citron

Acide chlorhydrique concentré

Soude ou potasse caustique ou carbonate de soude (ou sinon cendre)

Eau potable ou filtrée

* * *

BIBLIOGRAPHIE

N.B. Cette bibliographie n'a pas de caractère exhaustif, mais donne seulement la liste des articles ou ouvrages que nous ont été les plus utiles:

Achard M.A. (1994) "Etude et modélisation du transfert de CO2 dans les photobioréacteurs. Application à l'étude de la limitation par la source de carbone chez S. platensis", D.E.A. Université Blaise Pascal, Laboratoire de Génie Chimique Biologique.

Ayala F.A. et Benavente R.B. (1982) "An improved cheap culture medium for the blue-green microalga Spirulina", European J. of Appl. Microbiology and Biotechnology, 15, 198-199.

Becker E.W. (1995) "Microalgae, biotechnology and microbiology", Cambridge University Press.

Becker E.W. et Venkataraman L.V. (1982) "Biotechnology and exploitation of algae, the Indian approach"

Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco (1993), Numéro spécial 12: "Spiruline, algue de vie".

Bucaille P. "Intérêt et efficacité de l'algue spiruline dans l'alimentation des enfants présentant une malnutrition protéino-énergétique en milieu tropical". Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, 10/10/1990.

Busson F. (1971) "Spirulina platensis (Gom.) Geitler et Spirulina geitleri J. de Toni, cyanophycées alimentaires", Service de Santé, Parc du Pharo, Marseille.

Challem J.J. (1981) "La spiruline, apprenez à la connaitre dans l'intérêt de votre santé" Editions Générales de Diététique, 74108-Ville-la-Grand.

Chouard Ph., Michel H. et Simon M.F. (1977) "Bilan thermique d'une maison solaire"

Ciferri O. (1983) "Spirulina, the edible microorganism", Microbiological Reviews, 47, 551-578.

Cooper P.I. (1981) "The effect of inclination on the heat loss from flat plate solar collectors", Solar Energy, Vol. 27, N° 5, pages 413-420.

Cornet J.F. (1992) "Etude cinétique et énergétique d'un photobioréacteur" Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, 27/02/1992.

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Atti del convegno "Prospettive della coltura di spirulina in Italia", Firenze, 20-21/11/1980.

Consiglio Nazionale delle Ricerche (1987), IPRA Monografia N° 17 "Biotecnologie per la produzione di spirulina".

Desikachary T.V. (1959) "Cyanophyta", Indian Coucil of Agricultural Research, New Delhi, Inde.

Dillon J.C., Anh Phan Phuc et Dubacq J.P. (1995) "Nutritional value of alga spirulina", Plants in Human Nutrition, World Rev. Nutr. Diet., (Karger, Basel), 77, 32-46.

Dupire J. (1998) "Objectif : Malnutrition", Editions Similia, Paris

Durand-Chastel H. et Clément G. (1972) "Spirulina algae: food for tomorrow", Proc. 9th int. Congr. Nutrition, Mexico (Karger, Basel), 3, 85-90.

Fox R.D. (1986) "Algoculture: la spirulina, un espoir pour le monde de la faim", Edisud, Aix-en-Provence

Fox R.D. (1996) "Spirulina, production & potential", Edisud, Aix-en-Provence

Fox R.D. (1999) "Spiruline, Technique pratique et promesse", Edisud, Aix-en-Provence

Falquet Jacques (1996) "Spiruline, Aspects nutritionnels", Antenna Technologie, Genève.

Flamant Vert (1988) "Produire de la spiruline en systèmes autonomes", Editions de la Tempresse , Eaux-Vives, Suisse

Frappier R. (1992) "La spiruline, un aliment précieux pour la santé", Les Editions Asclépiades Inc., Montréal.

Farrar W.V. (1966) "Tecuitlatl: a glimpse of Aztec food technology", Nature, 211, 341-342.

Funteu F. "Effet des facteurs de l'environnement sur le métabolisme lipidique et activités biologiques des substances lipophiles chez une cyanobactérie filamenteuse, Spirulina platensis", I.N.R.A. Paris-Grignon, 18/09/1996.

Gilles R. (1976), Promoclim A, N° spécial "Les piscines de plein air" (page 269), SEDIT, Paris

Guérin-Dumartrait E. et Moyse A. (1976) "Caractéristiques biologiques des spirulines", Ann. Nutr. Aliment. 30, 489-496.

Henrikson R. (1994 et 1997) "Earth food Spirulina, How this remarkable blue-green algae can transform your health and our planet", Ronore Enterprises Inc., U.S.A.

Henrikson R. (1994) "Spirulina, superalimento del futuro", Ediciones Urano, Barcelone.

Iltis A. (1974) "Le phytoplancton des eaux natronées du Kanem (Tchad), influence de la teneur en sels dissouts sur le peuplement algal", thèse de doctorat, Université de Paris VI.

Jeeji Bai N.and Seshadri C.V. (1988) "Small scale culture of Spirulina (Arthrospira) as a food supplement for rural household - technology development and transfer", Arch. Hydrobiol. Suppl. 80, 1-4, 565-572

Jourdan J.P. (1993) "Solarium spirulina farm in the Atacama desert (North Chile)", Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco, N° spécial 12.

Jourdan J.P. (1993) "Survival type production of spirulina", 6th International conference on applied algology, Ceske Budejovice.

Jourdan J.P. (1996) "Sugar as a source of carbon for spirulina (Arthrospira platensis) culture", International symposium on Cyanobacterial biotechnology", Bharathidasan University, Tiruchirapalli, Inde.

Kohl A.L. et Riesenfeld F.C. (1960) "Gas Purification", McGraw-Hill Book Co.

MANOHARAN R. "Improvement of bioavailable iron in Spirulina fusiformis", Spirulina ETTA National Symposium, MCRC, Madras (1992), p. 98

MELISSA (1996) "Final report for 1995 activity", Agence Spatiale Européenne, Noordwijk, Hollande

MELISSA (1997) "Final report for 1996 activity", Agence Spatiale Européenne, Noordwijk, Hollande

Michka (1992) "La spiruline, une algue pour l'Homme et la Planète", Georg Editeur SA, Genève.

MCRC (1993) "Large scale nutritional supplementation with spirulina alga", Final project report, Department of Biotechnology, Ministry of Science and Technology, New Delhi, Inde.

Montenegro Ferraz C.A., Aquarone E., Florenzano G., Balloni W. et Tredici M. "Utilizaçao de sub-produtos da industria alcooleira na obtençao de biomassa de spirulina maxima, Parte I - emprego do anidrido carbonico".

Paniagua-Michel J., Dujardin E. et Sironval C. (1993) "Le Tecuitlal, concentré de spirulines source de protéines comestibles chez les Aztèques", Cahiers de l'Agriculture 1993; 2, 283-287.

Puyfoulhoux G., Rouanet J-M., Besançon P.,Baroux B., Baccou J-C.,Caporiccio B. (2001) "Iron availability from iron-fortified spirulina by an in-vitro digestion/Caco-2 cell culture model", J. Agric. Fodd Chem., Vol 49, Issue 3, pp 1625-29

Saury A. (1982) "Les algues, source de vie", Editions Dangles, 45800 Saint Jean de Braye.

Seshadri C.V. et Jeeji Bai N. (1992) "Spirulina ETTA national symposium", MCRC, Madras, Inde.

Tomaselli L., Giovanetti L., Pushparaj B. et Torzillo G. (1987) "Biotecnologie per la produzione di spirulina", IPRA, Monografia 17 (page 21)

Venkataraman L.V. (1993) "Spirulina in India", Proc. National Seminary Cyanobacterial Research-Indian Scene, NFMC, BARD, Tiruchirapalli, Inde.

Vonshak A. (1997) "Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-biology, and Biotechnology", Taylor and Francis

Warr S.R.C., Reed R.H., Chudek J.A., Foster R. et Stewart W.D.P. (1985) "Osmotic adjustment in Spirulina platensis", Planta 163, 424-429.

Willcock C. (1974) "La grande faille d'Afrique", Editions Time-Life, Amsterdam

Zarrouk C. "Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima (Setch et Gardner) Geitler", Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 06/12/1966.